

大強度パルスミュオン対応 の高速応答検出器の開発

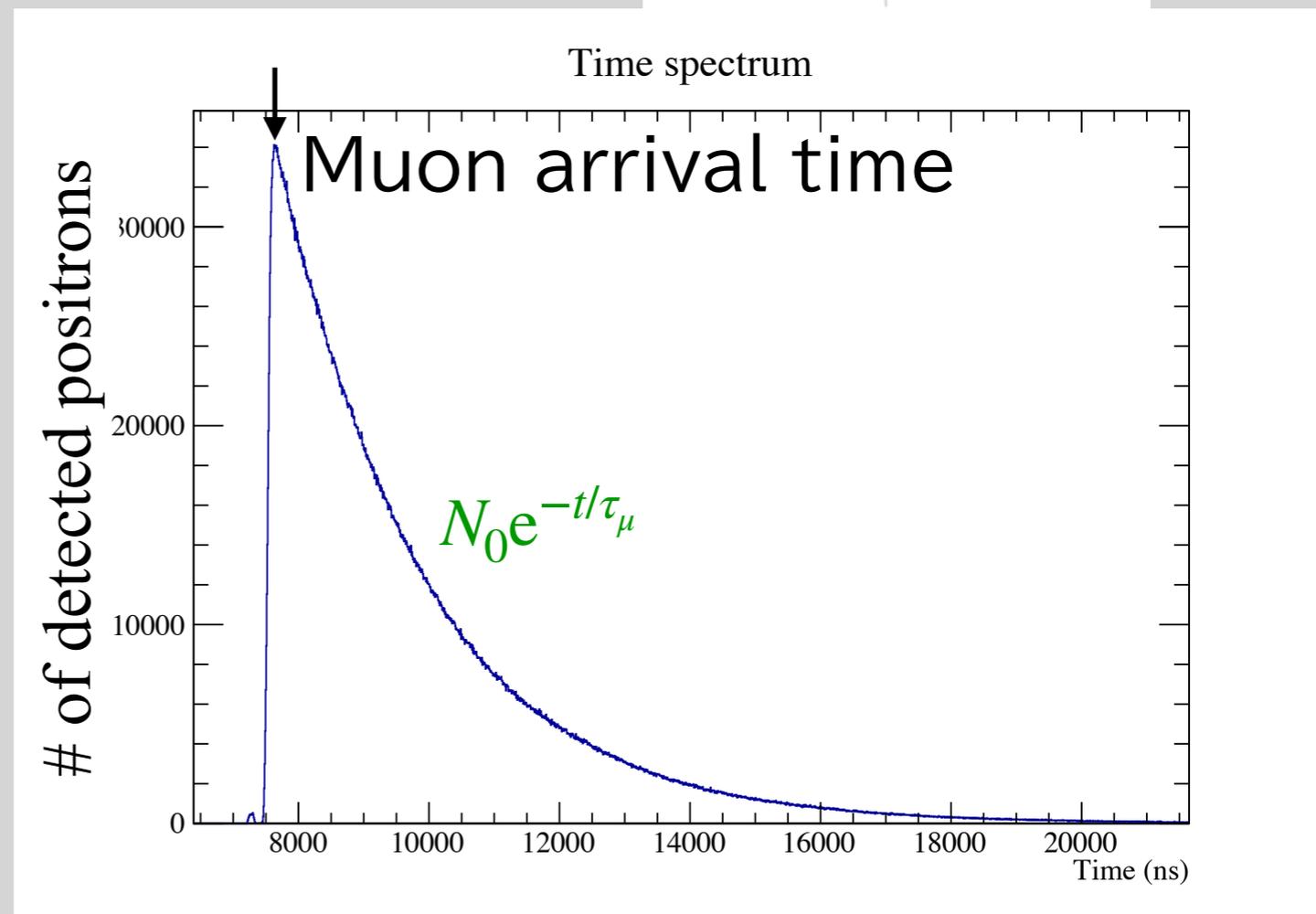
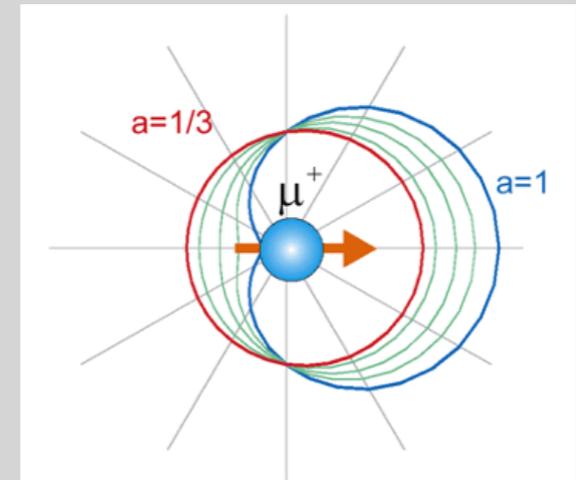
2023/11/20

西村 昇一郎 | KEK IMSS/J-PARCセンター

Detectors for Muon Physics

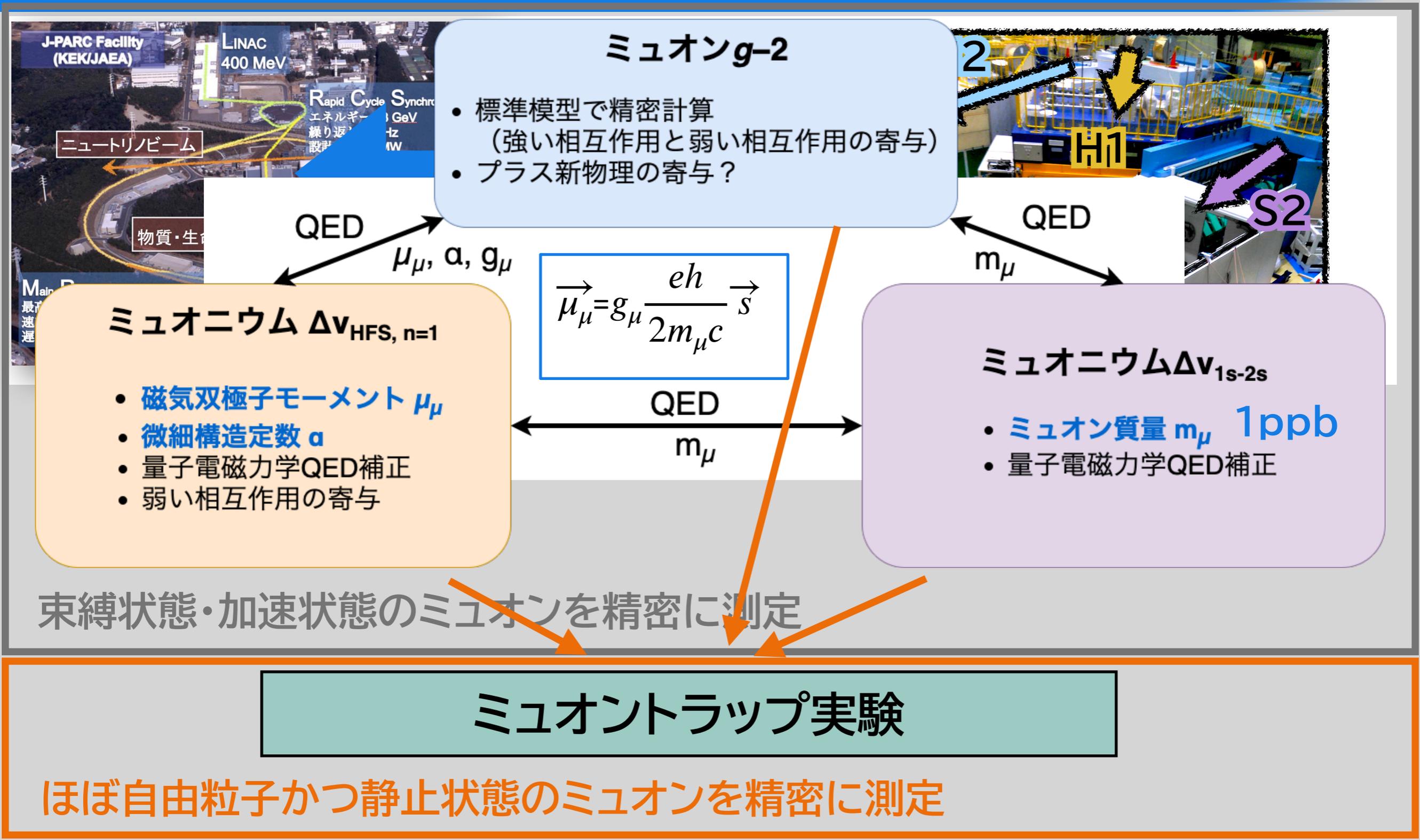
Muon decay positrons have information

- Muon spin direction
- Decay point
- Muon life-time



It is important to count the number of positrons accurately

ミュオン基礎物理実験



ミュオントラップ実験

目的 | ミュオン基礎物理定数の精密測定

- q/m (~ 1 ppb)
- muon magnetic moment (~ 1 ppb)
- muon life (~ 1 ppm)

$116\,592\,061(41) \times 10^{-11}$ 0.35 ppm

Property	Symbol	Value	Precision
Mass	m_μ	105.658 3715(35) MeV	34 ppb
Mean Lifetime	τ_μ	$2.196\,9811(22) \times 10^{-6}$ s	1.0 ppm
Anom. Mag. Moment	a_μ	$116\,592\,091(63) \times 10^{-11}$	0.54 ppm
Elec. Dipole Moment	d_μ	$< 1.9 \times 10^{-19} e\cdot\text{cm}$	95% C.L.

B. Abi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **126**, 141801 (2021)

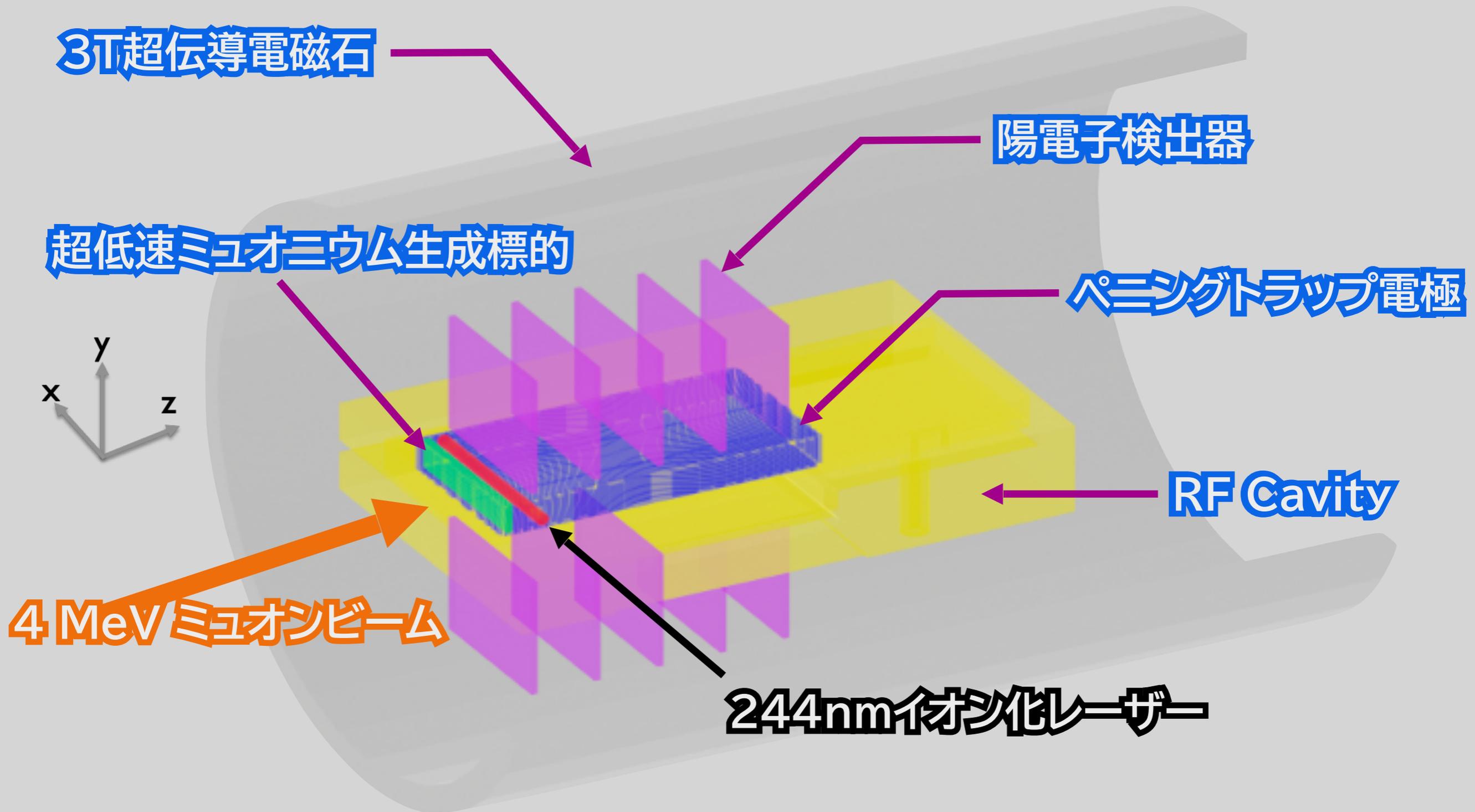
第一目標 | Muonをtrapする装置開発、実証試験

Muon trapを実現させるポイント

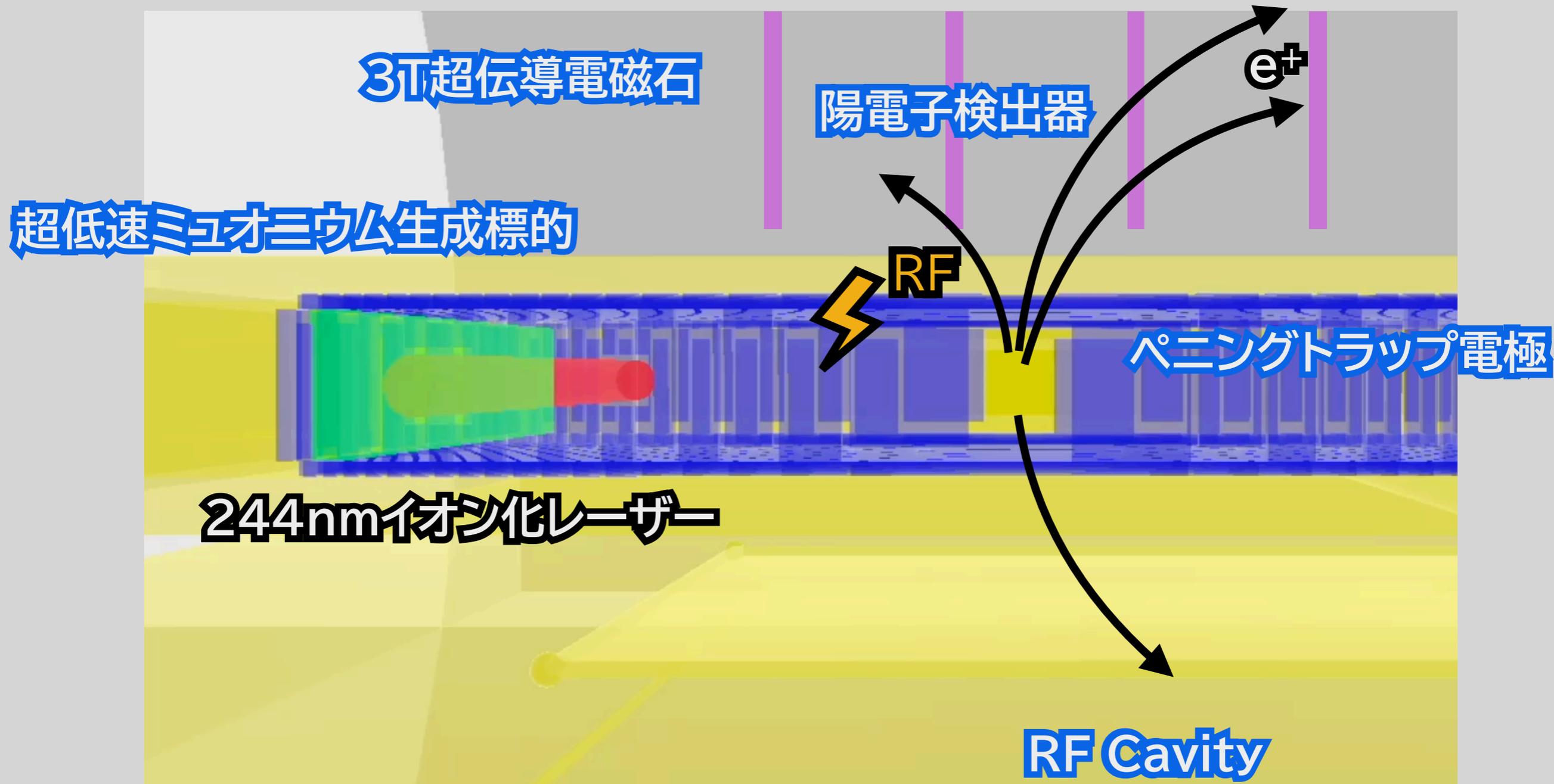
- 短寿命のミュオンをトラップして振動周波数を測定 (困難)
- 大強度超低速ミュオンビームが必要

J-PARC MUSEの大強度ミュオンビームで初めて実現

実験セットアップ



実験セットアップ



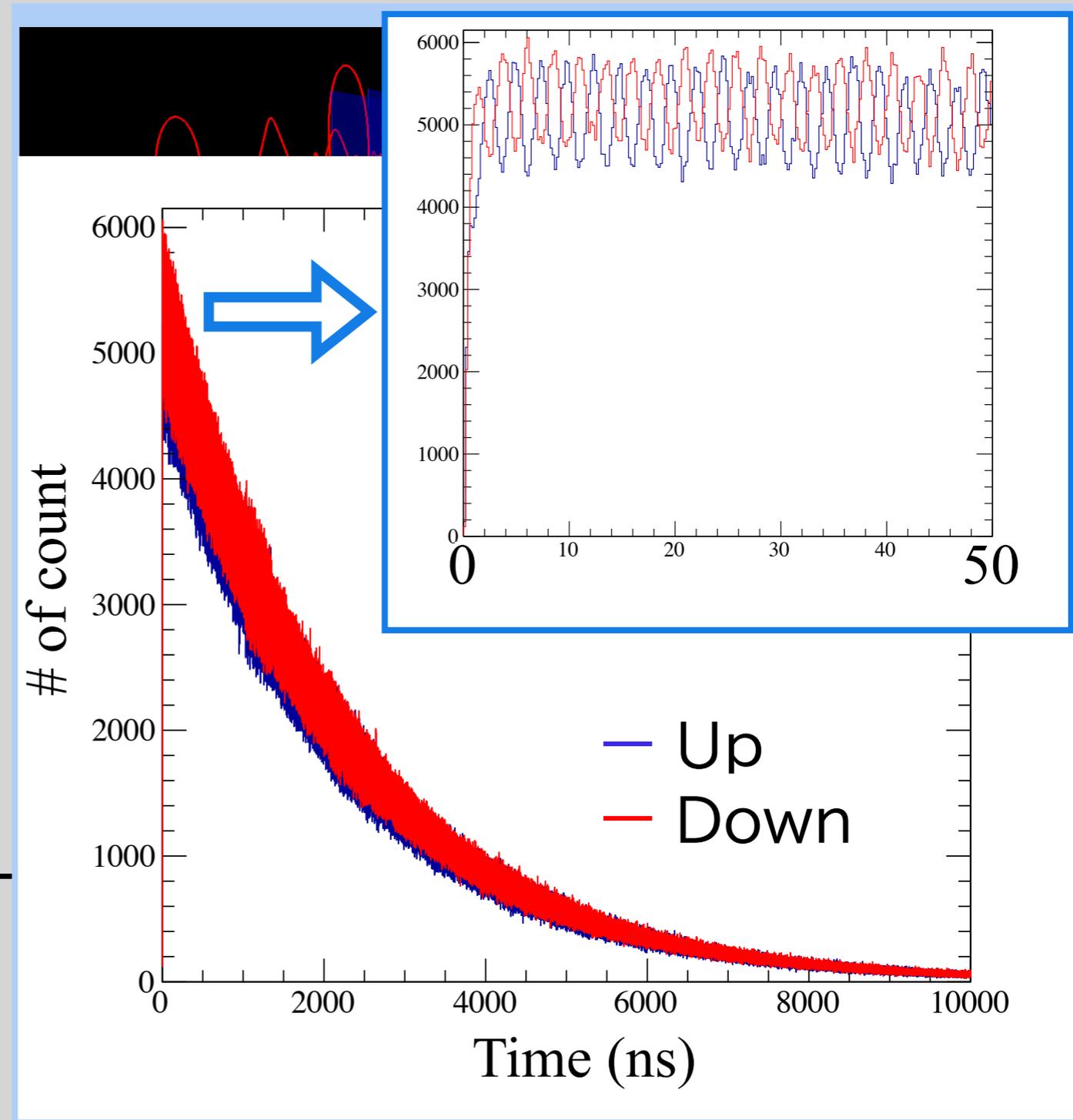
崩壊陽電子検出

Simulation条件

- 磁場 | 2.9 T
- 初期スピン方向 | 水平方向
(下向きに回転開始)
- 検出器配置 | 鉛直方向に 35 mm離れた場所に設置

Larmor回転

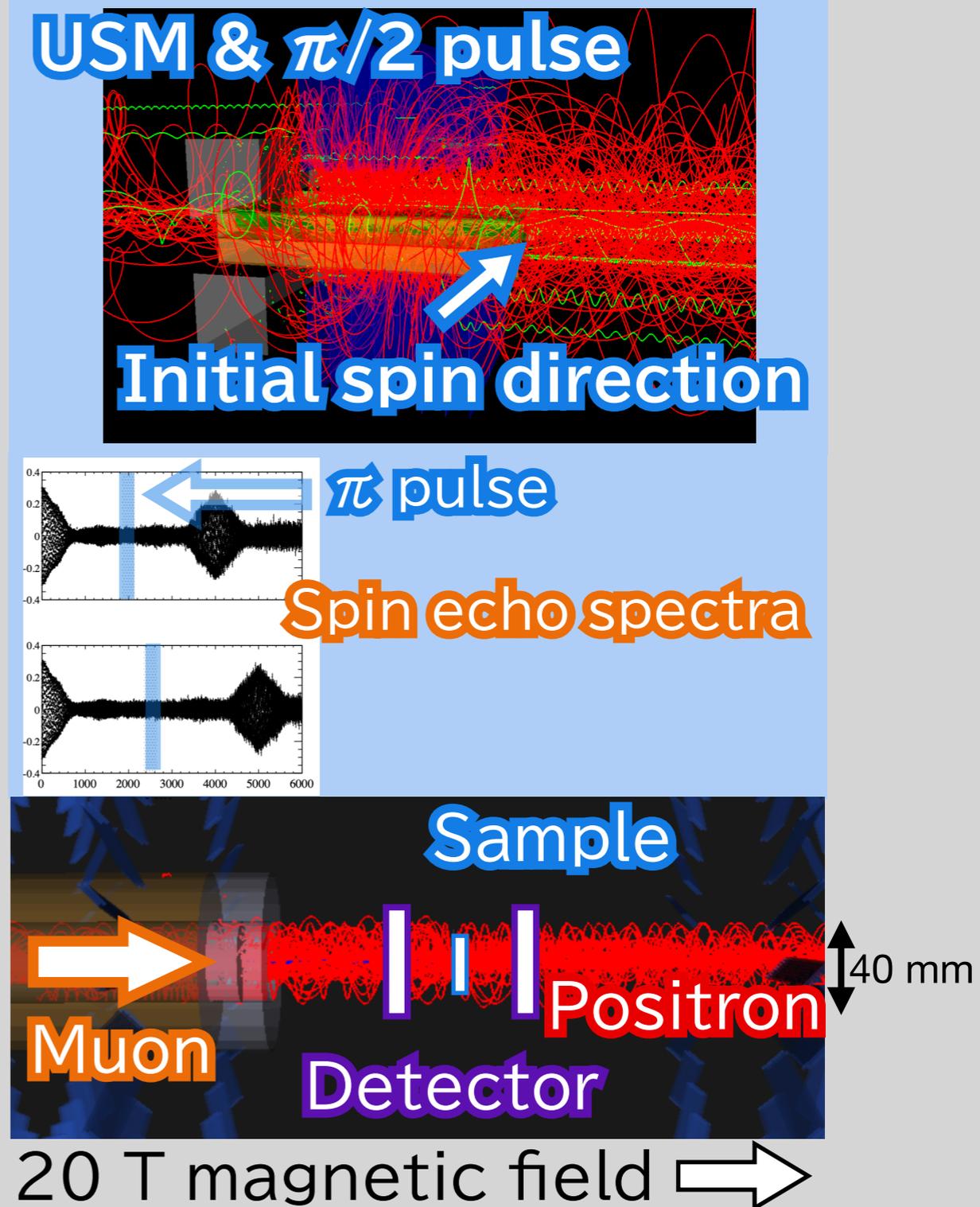
- $135.53 \text{ MHz/T} \times 2.9 \text{ T} = 393.037 \text{ MHz}$
- 周期 | 2.55 ns



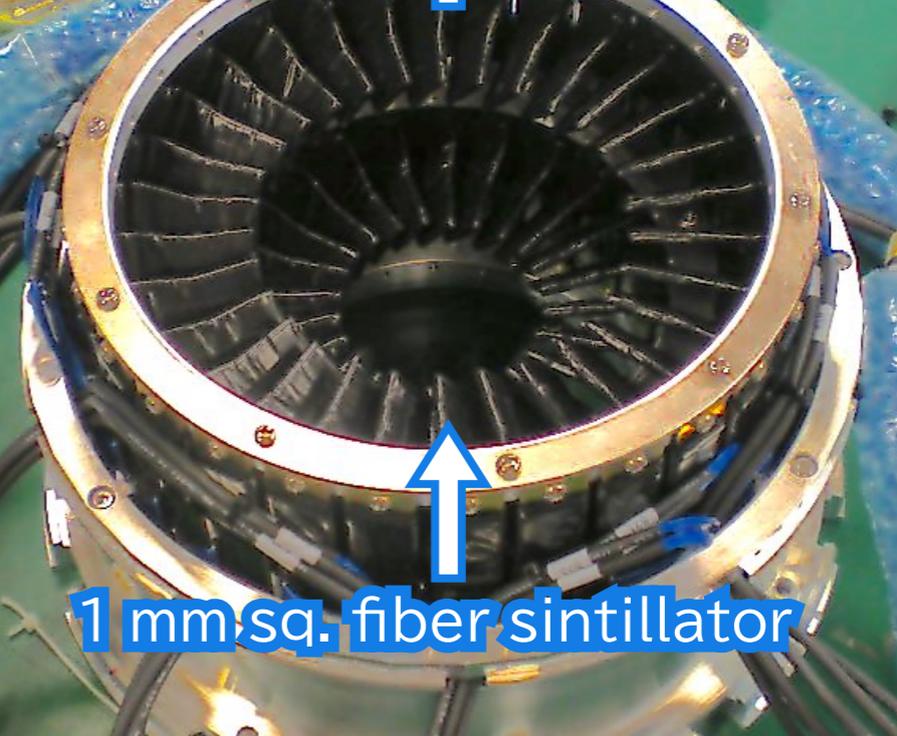
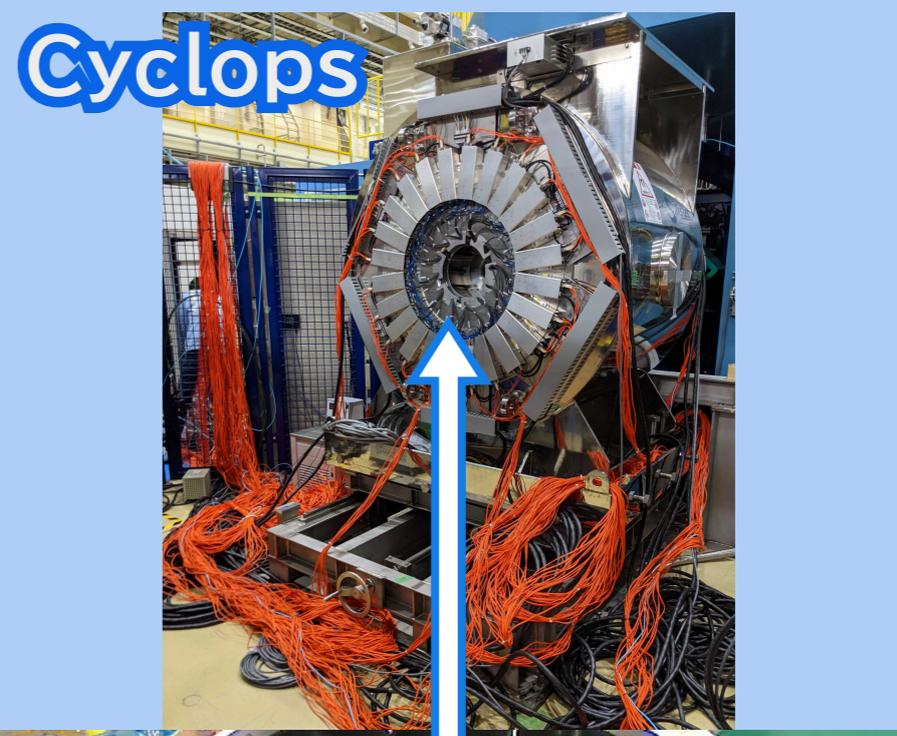
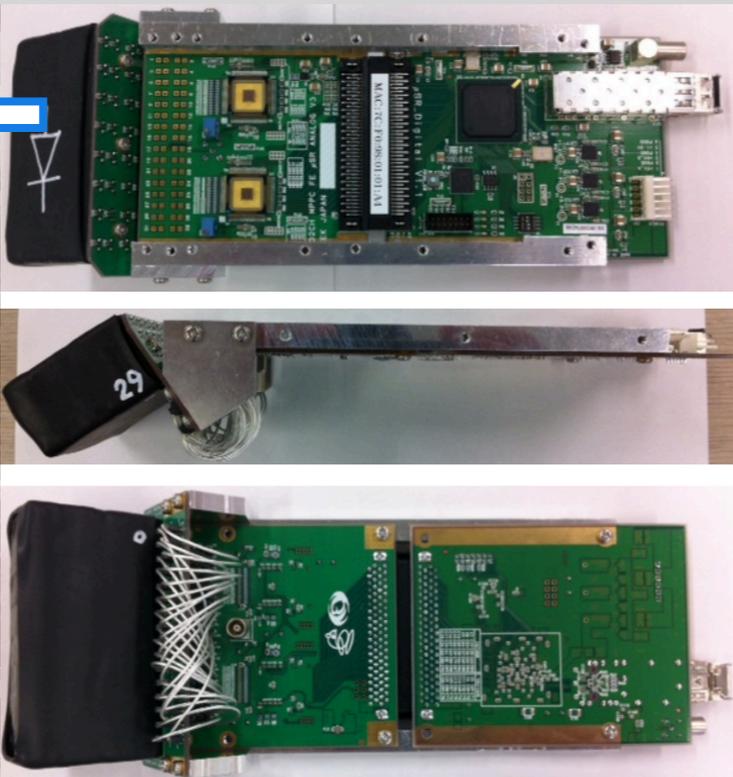
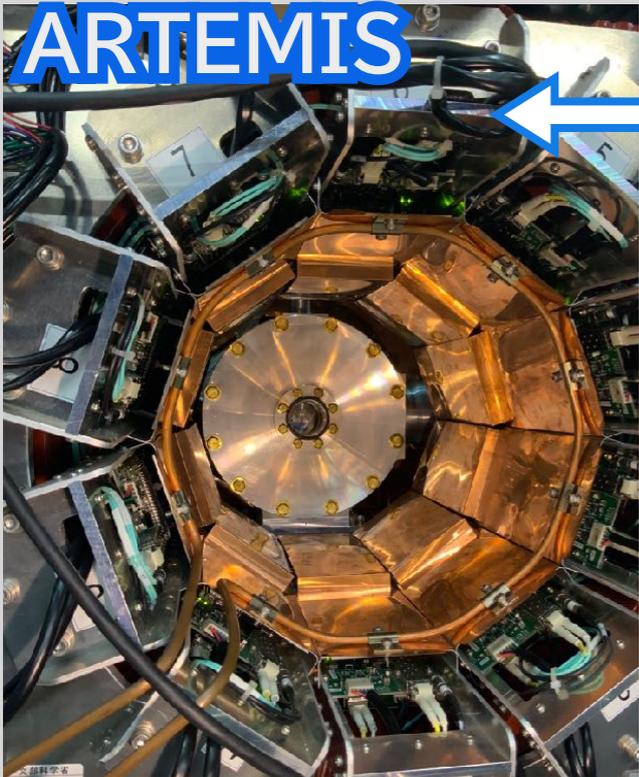
Experiments with New Detector in the Future

Next-generation μ SR

- High TF measurement (~ 5 T)
 - ◆ with USM & $\pi/2$ pulse
 - ◆ Tracking decay positron
- Spin echo
 - ◆ Precise measurement of slow relaxation
- μ SR under extreme magnetic field (~ 20 T)
 - ◆ LCR measurement
 - ◆ Extreme counting rate
 - ◆ Surface muon beam can penetrate 100 μ m sensor
- Stroboscopic measurement with more statistics
 - ◆ Precise measurement of transient phenomenon

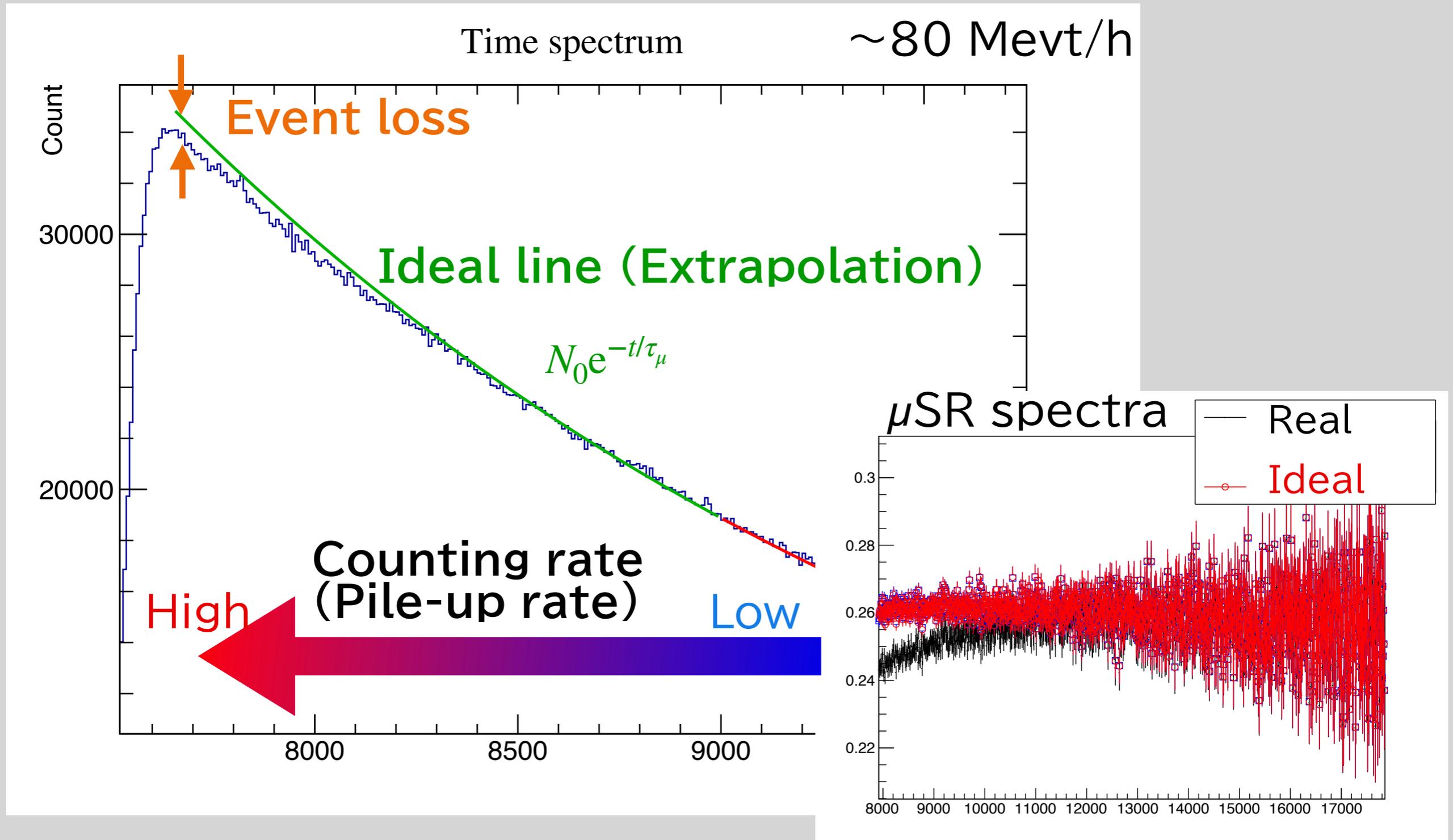


μ SR Spectrometers at J-PARC



	Magnetic Field	Detector	# of ch
ARTEMIS	0.4 T	10mm sq. x12 mm Plastic sintillator	1,280 ch
Cyclops	5 T	1 mm sq. x45 mm Fiber sintillator	3,008 ch

現在のイベント消失の様子



パイルアップに対する対応策

検出器の微細化

半導体検出器！

速い応答

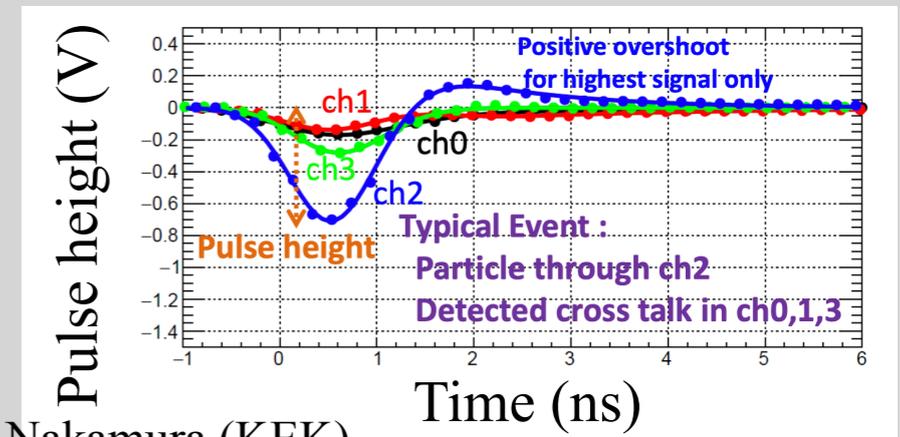
最新の半導体検出器

新しい検出器候補1

Low Gain Avalanche Detector (LGAD)

- Signal gained in the sensor

- ◆ Large signal
- ◆ Thin sensor
- ◆ Simple readout electronics



Koji Nakamura (KEK)

- Fast response

Standard silicon	Signal width	Time resolution
LGAD	~ 100 ns	~ a few ns
	~ 1 ns	~ 30 ps

Signal width

Time resolution

~ 100 ns

~ a few ns

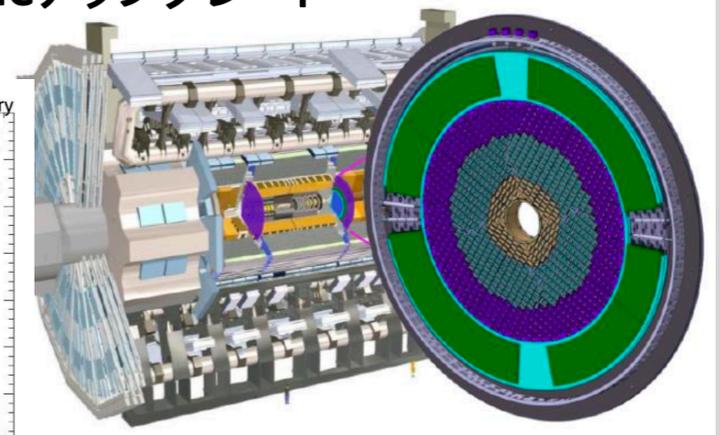
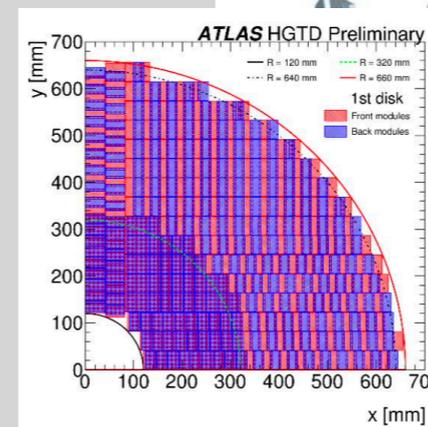
~ 1 ns

~ 30 ps

- Example | LHC ATLAS HGTD

高輝度LHCアップグレード

- ◆ High Gain Timing Detector
- ◆ 1.3 mm sq. 300 μ mt
- ◆ Hybrid sensor



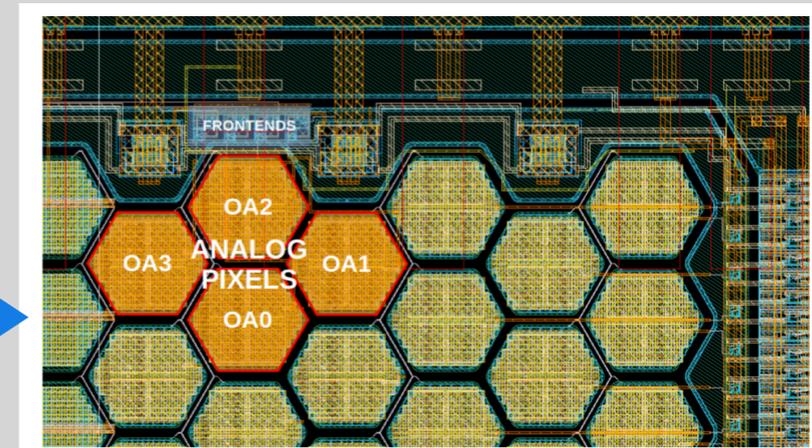
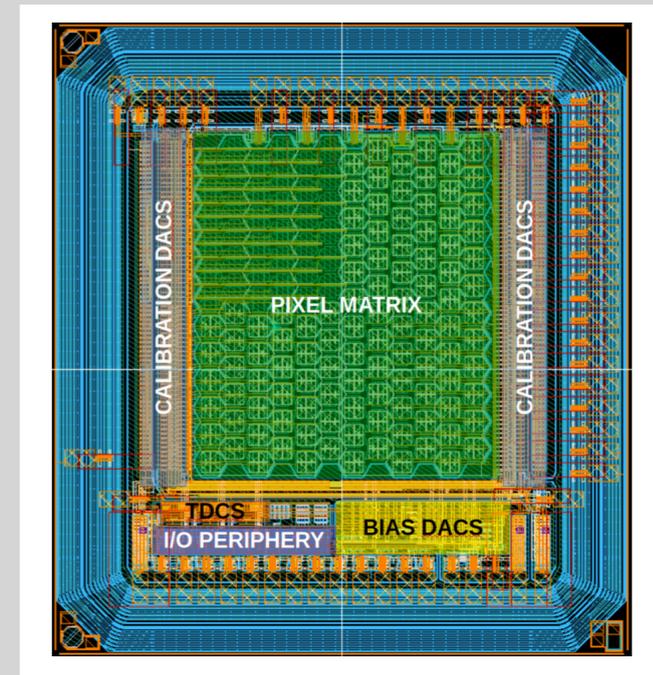
ATLAS group

新しい検出器候補2

SiGe BiCMOS Monolithic sensor

- SiGe Heterojunction Bipolar Transistors
- Integrated fast readout circuit
- Fast response
- Developed by Univ. of Geneva
- Example
 - ◆ FASER experiment (LHC)
 - * 7.5×15 mm² prototype was created

Hexagonal pixel sensor
with 65 μm on a side



G. Iacobucci *et al.*, JINST 17 P02019 (2022)

Summary Table

	SiPM + Plastic Scintillator (Current)	Standard Silicon Detetor	AC-LGAD	SiGe Monolithic BiCMOS
Granularity	1,000 μm \times fiber length (50,000 μm)	$\sim 50 \mu\text{m}$	<u>$\sim 50 \mu\text{m}$</u>	less than 50 μm is possible
Thickness	> 1000 μm	180 μm	less than 180 μm maybe possible	less than 180 μm maybe possible
Signal time width	<u>40-100 ns</u>	$\sim 100 \text{ ns}$	<u>$\sim 2 \text{ ns}$</u>	a few ns
Time resolution	a few ns	a few ns	$\sim 30 \text{ ps}$	$\sim 100 \text{ ps}$

Pile-up rate can be improved by at least a factor of 10,000

AC-LGAD Beam Test at S1

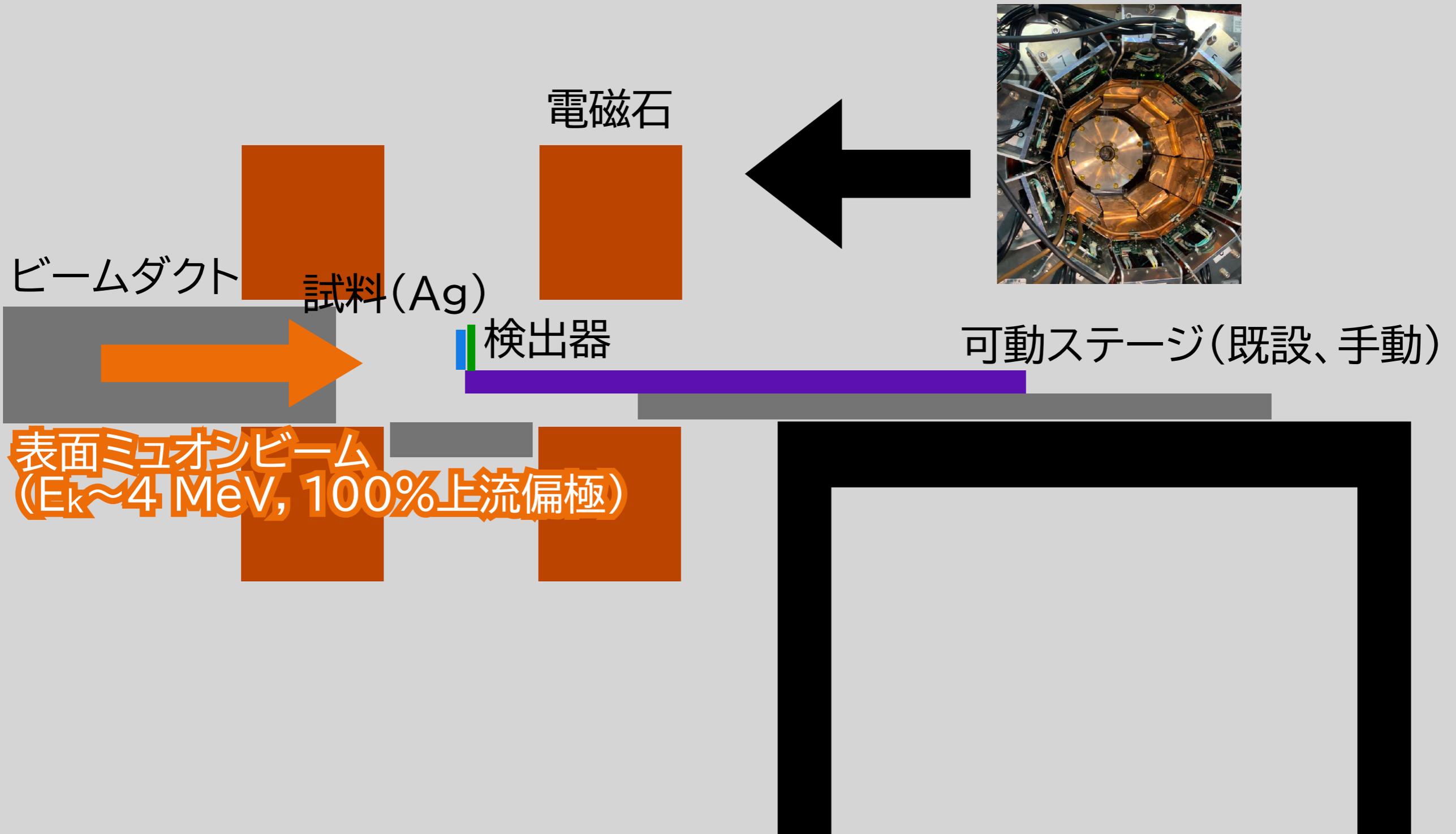
S1ビーム試験 (2023/06/14)

- 大強度パルスミュオンビームでの応答確認
- 現行シンチより近い位置でpile-up event lossがほぼない時間スペクトルを測定

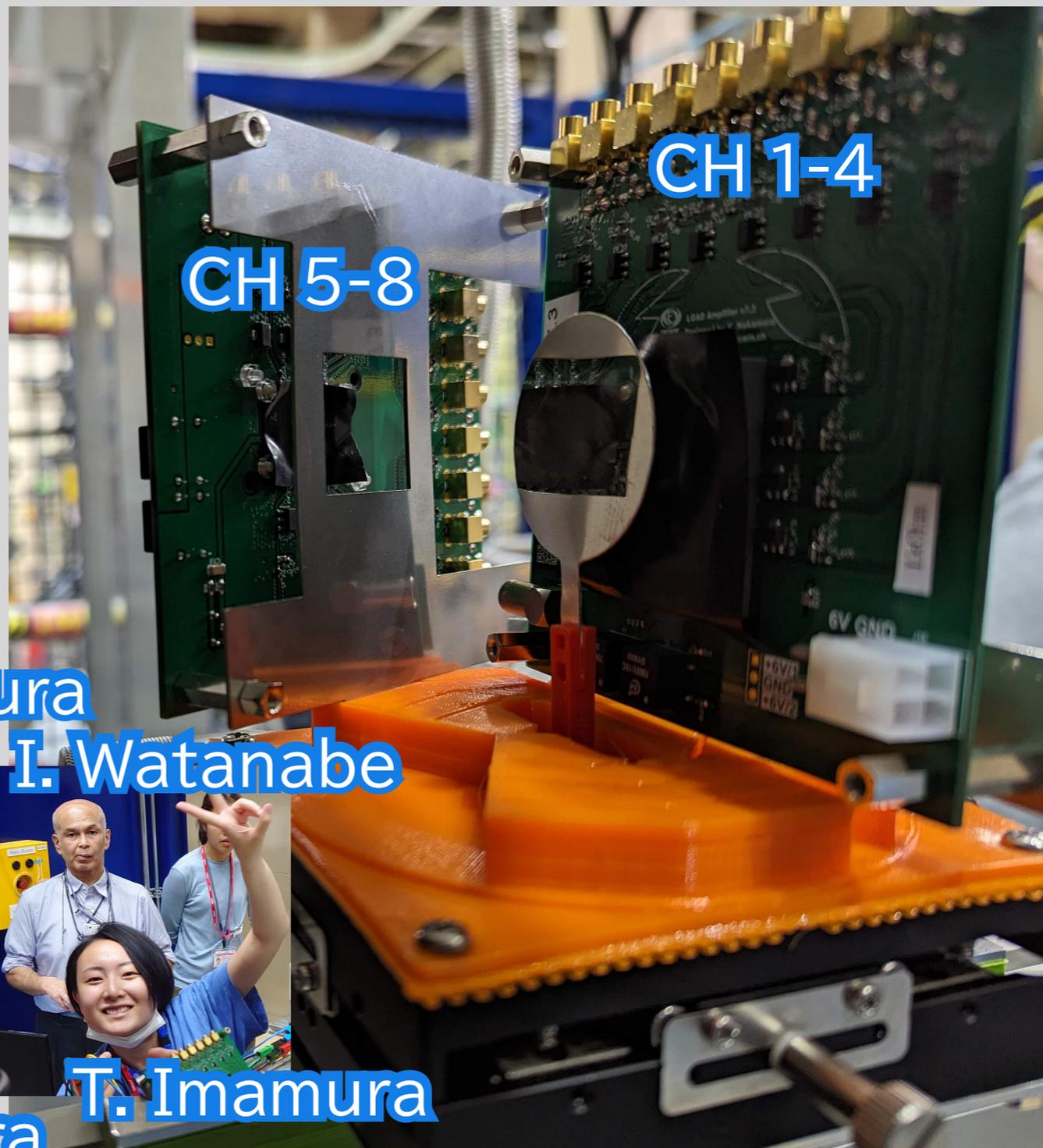
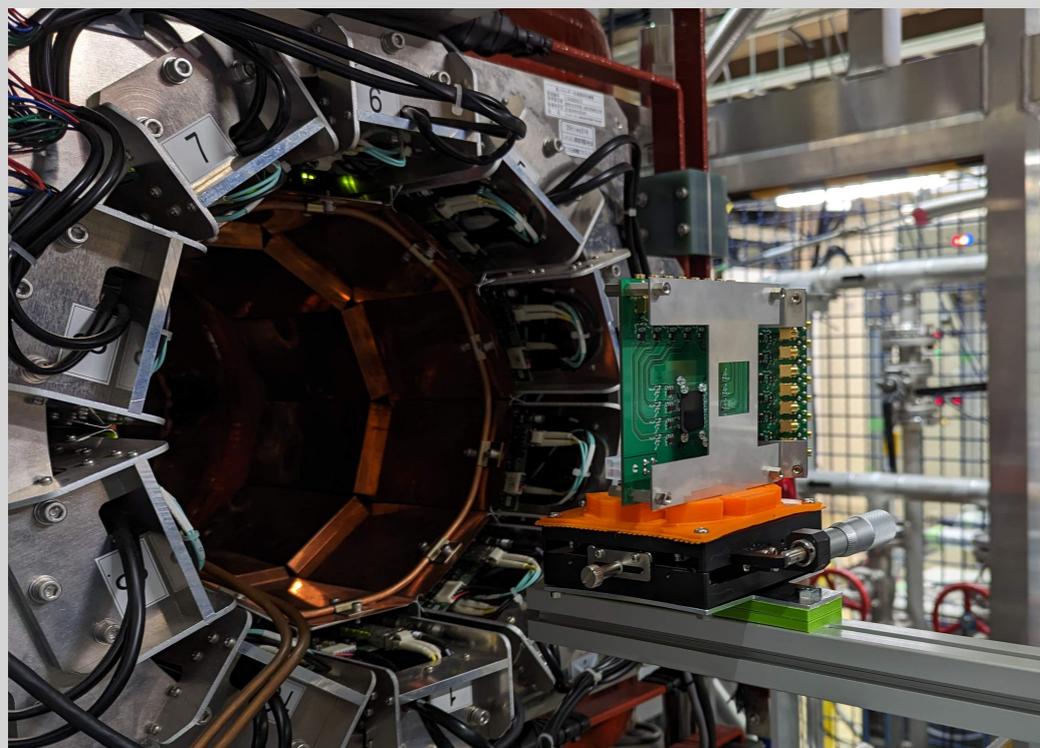
測定条件

- ダブルパルス
- ビームスリットFull Open
- ◆ μ SRカウンターのイベントレート 686Mevt/h (7.6evt/pulse/ch)
- ◆ 現行のカウンターだと超絶歪み
- * そもそもDAQもまともに動かない

実験セットアップ



検出器試験の様子



S. Kita

K. Nakamura

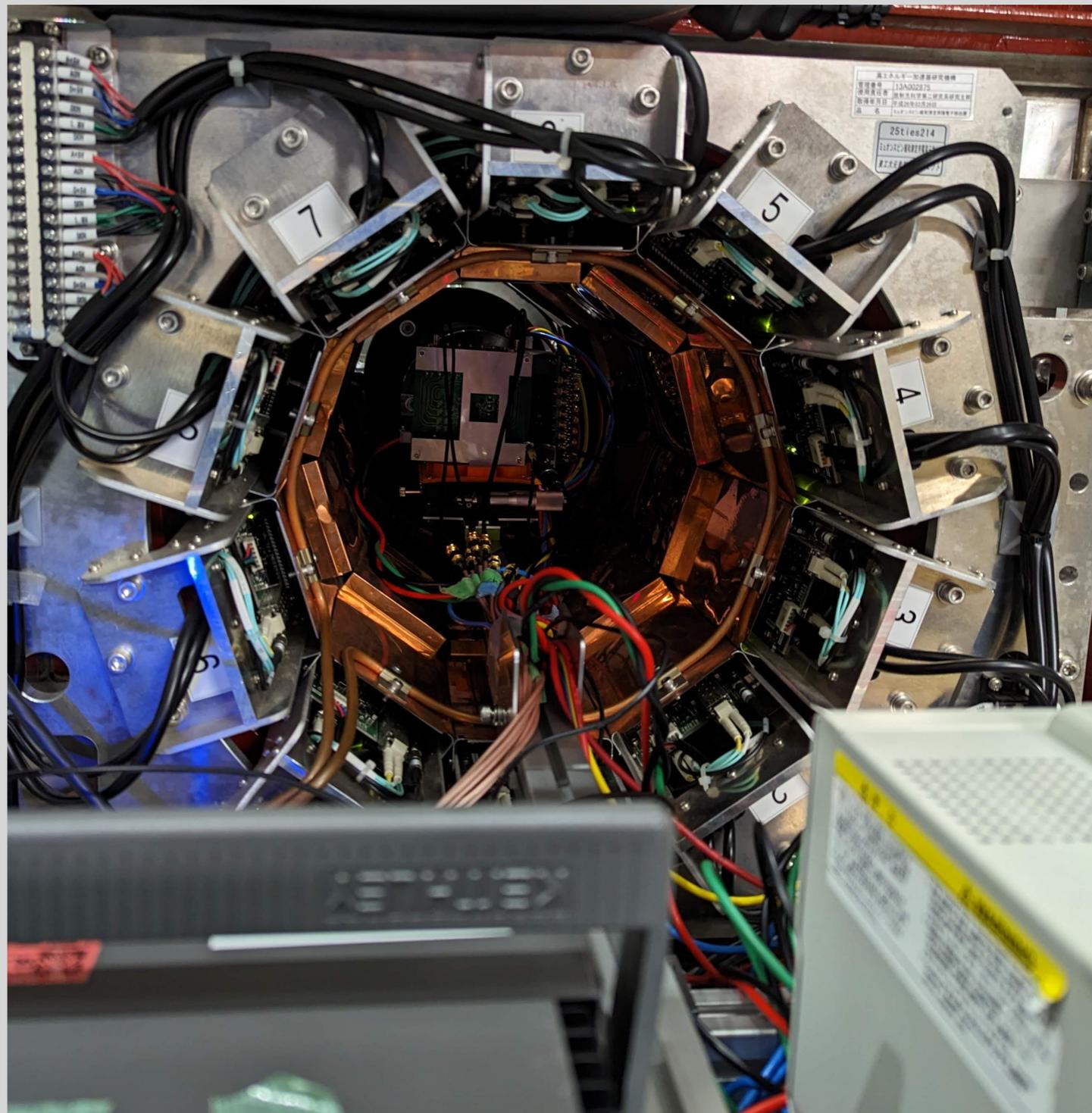
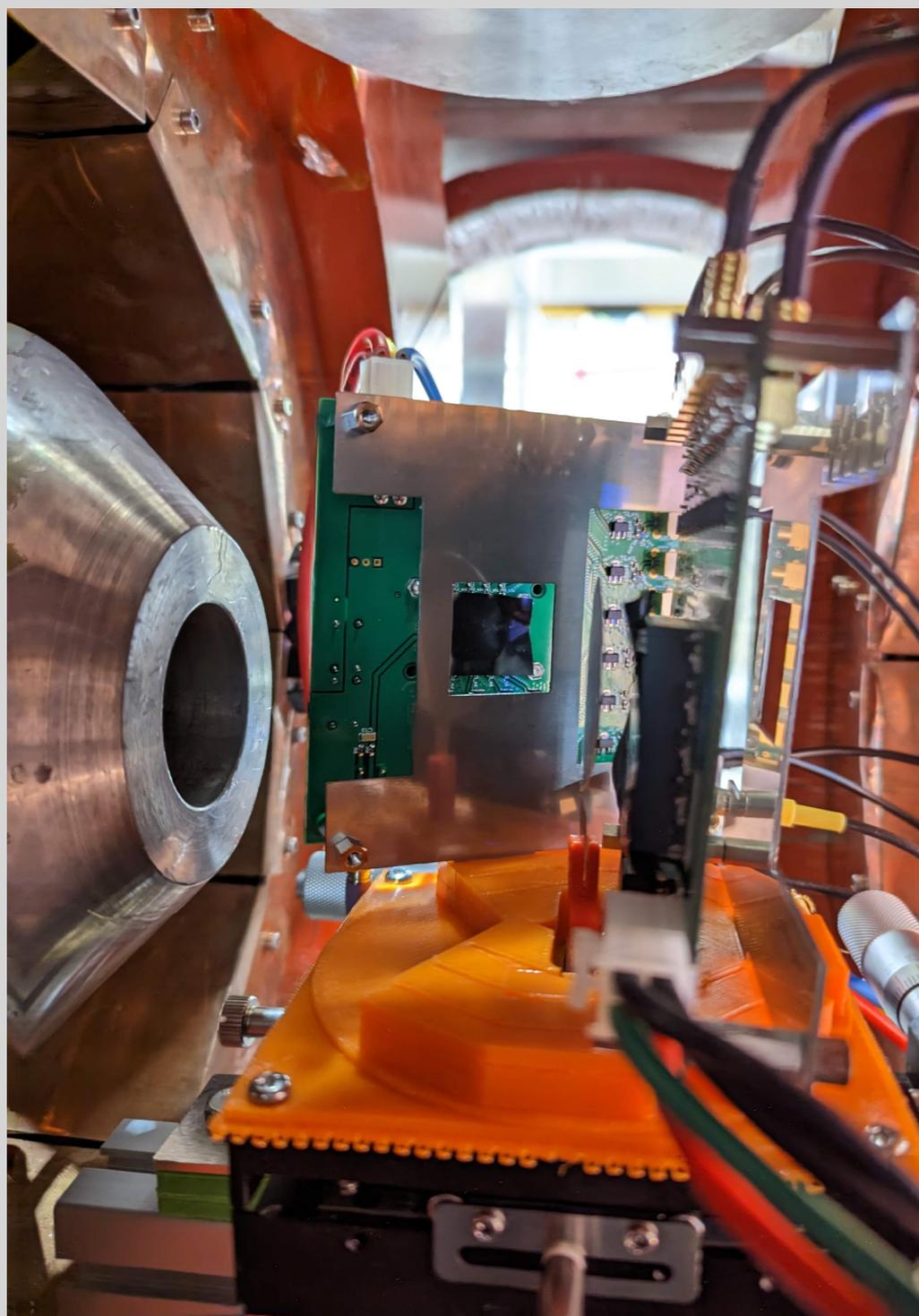
I. Watanabe

T. Imamura

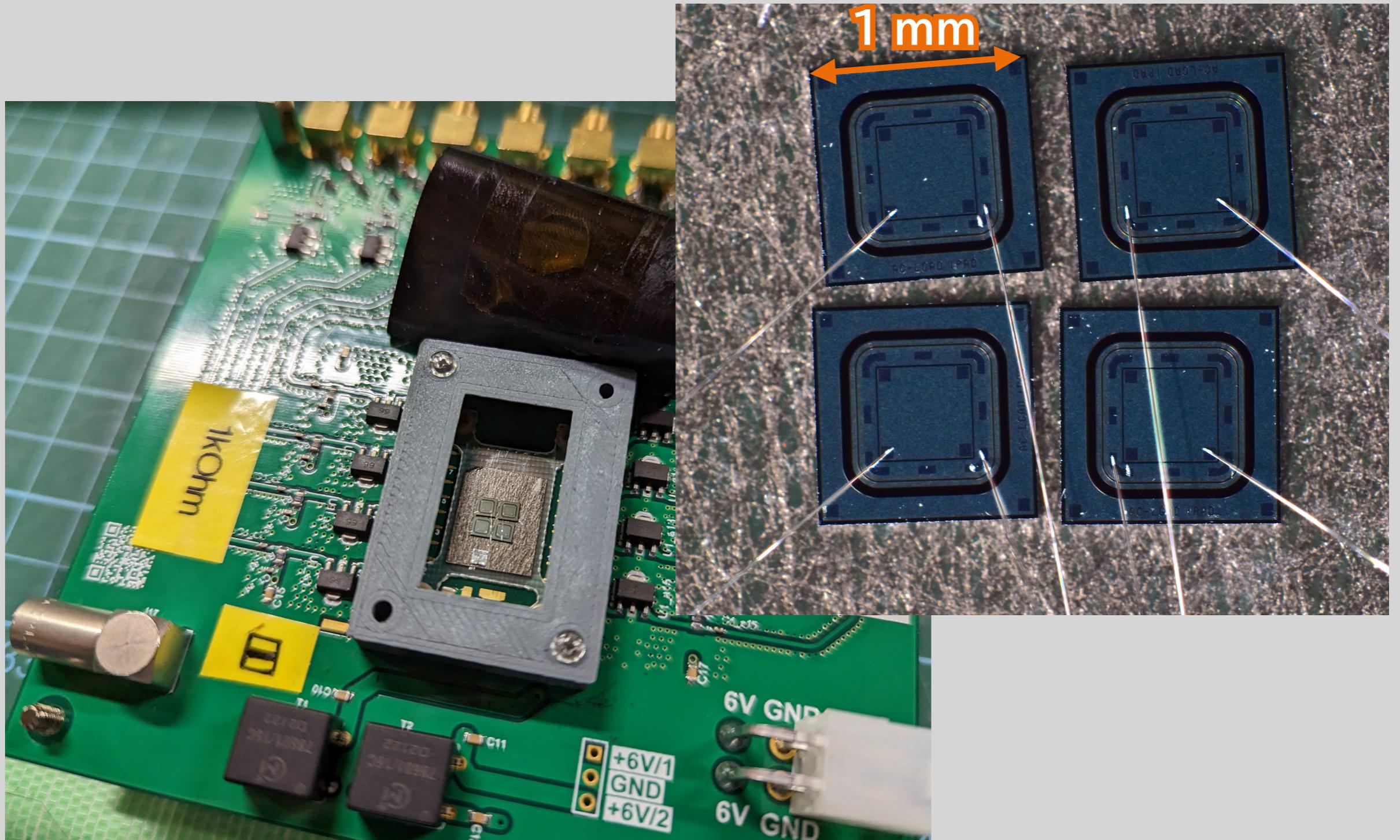
P. Jaikaew

K. Shimomura

検出器セットアップ



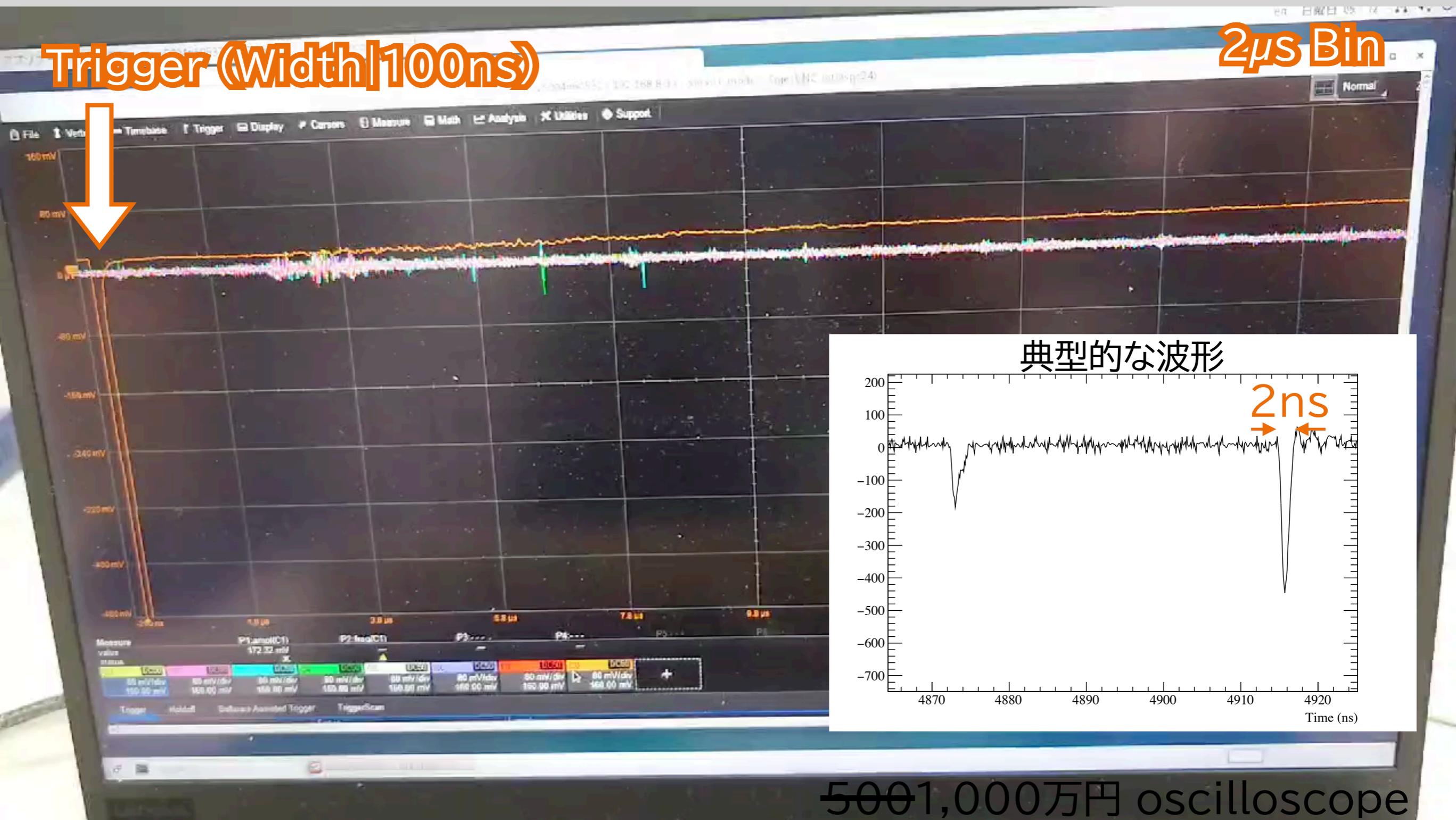
AC-LGADセンサー部分



Waveform of Positron Signal

Trigger (Width 100ns)

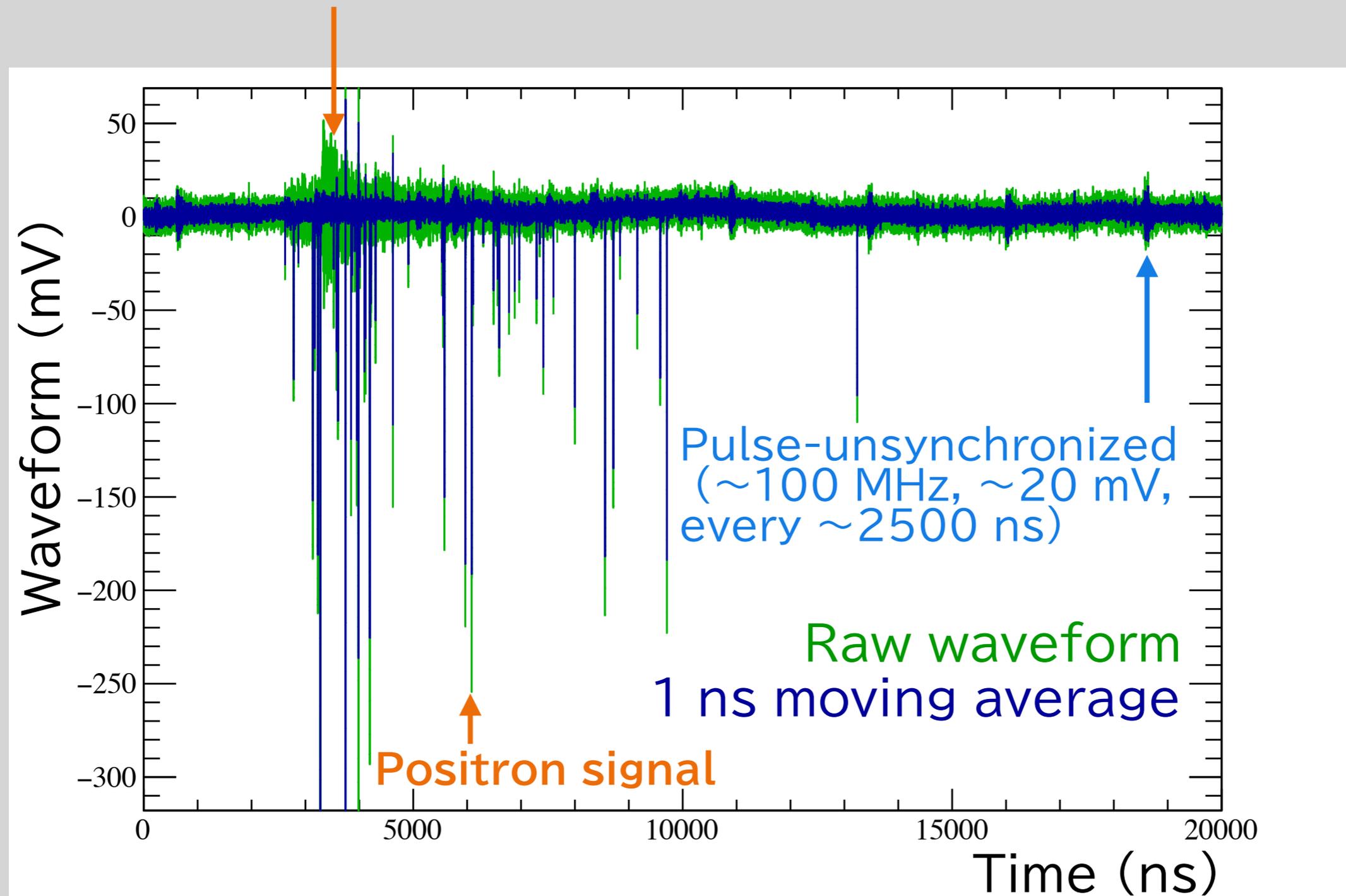
2 μ s Bin



5001,000万円 oscilloscope

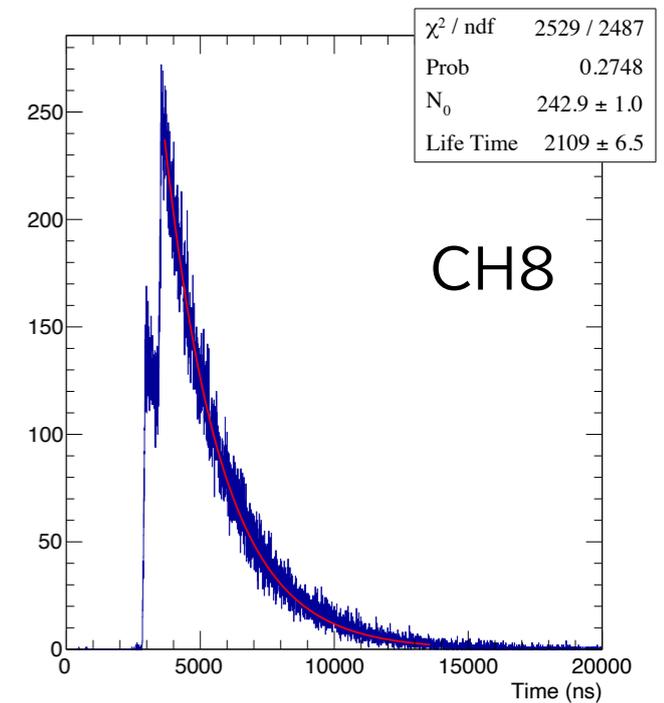
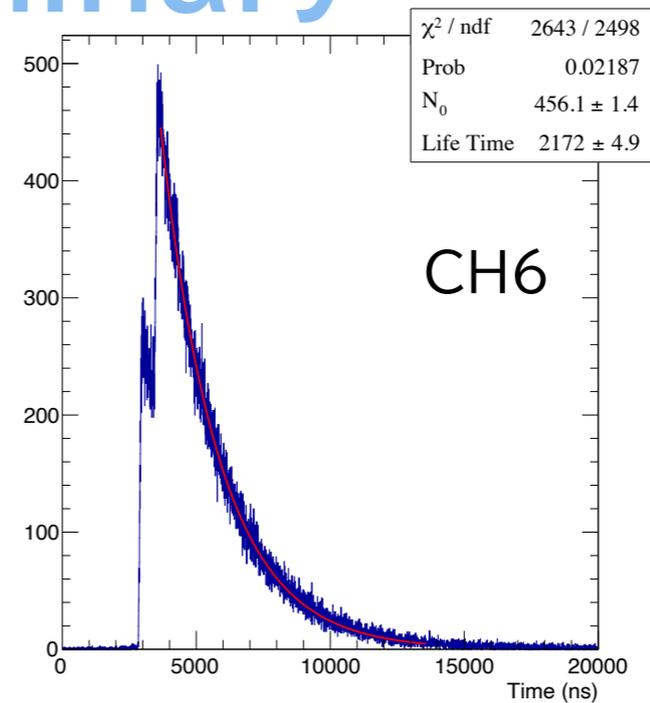
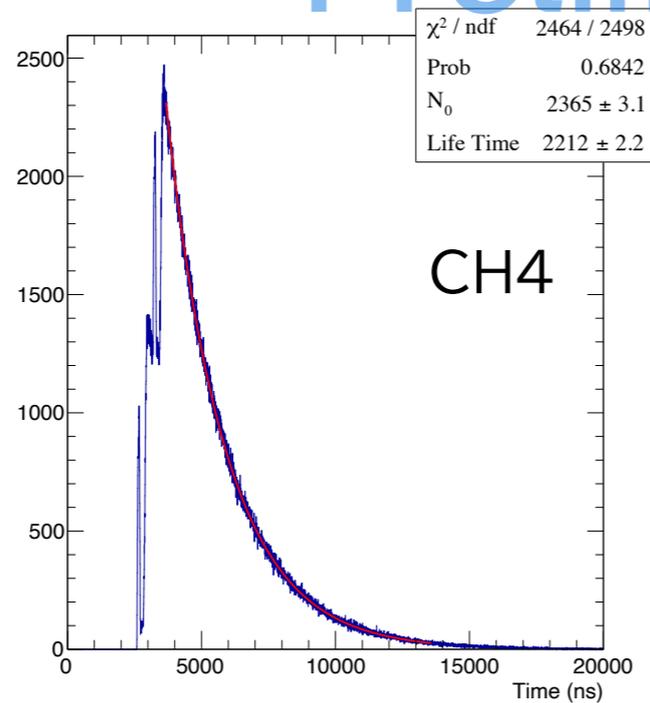
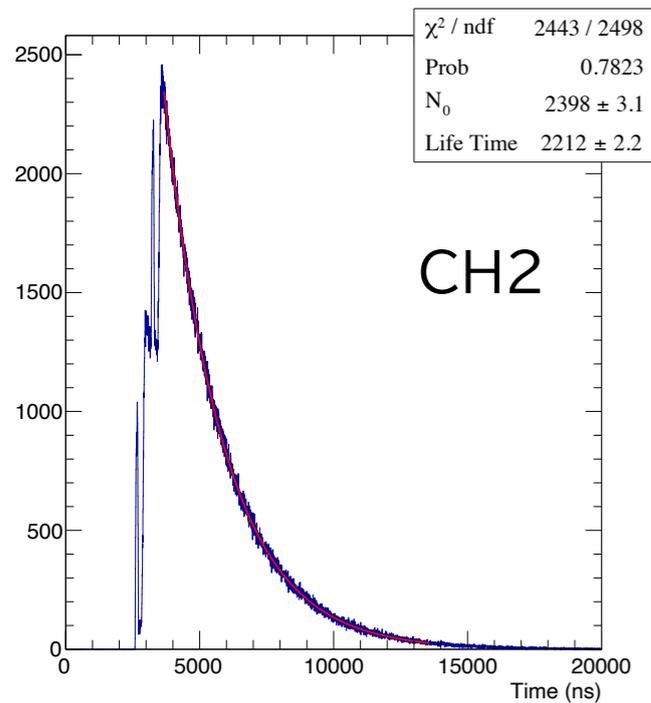
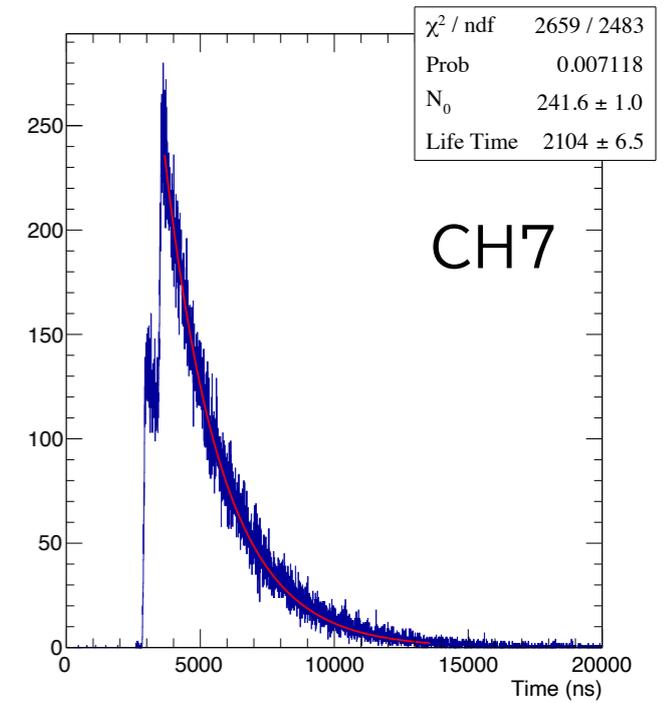
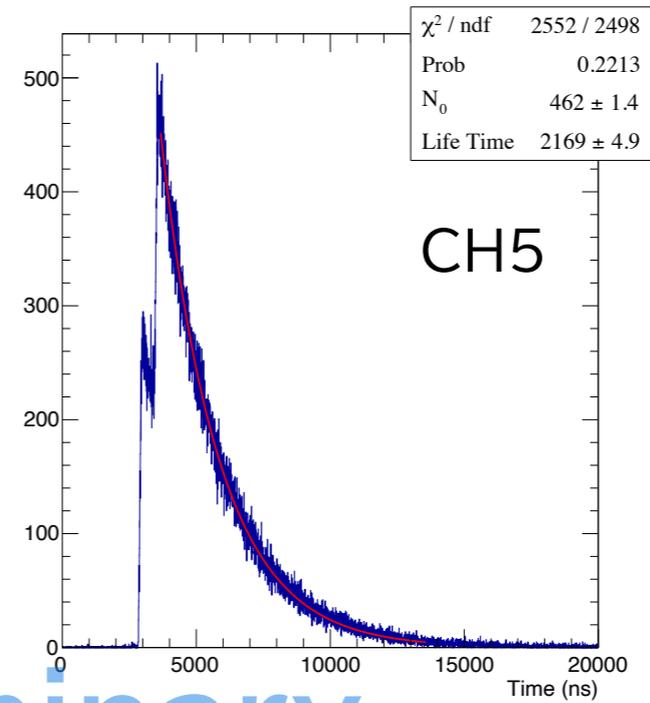
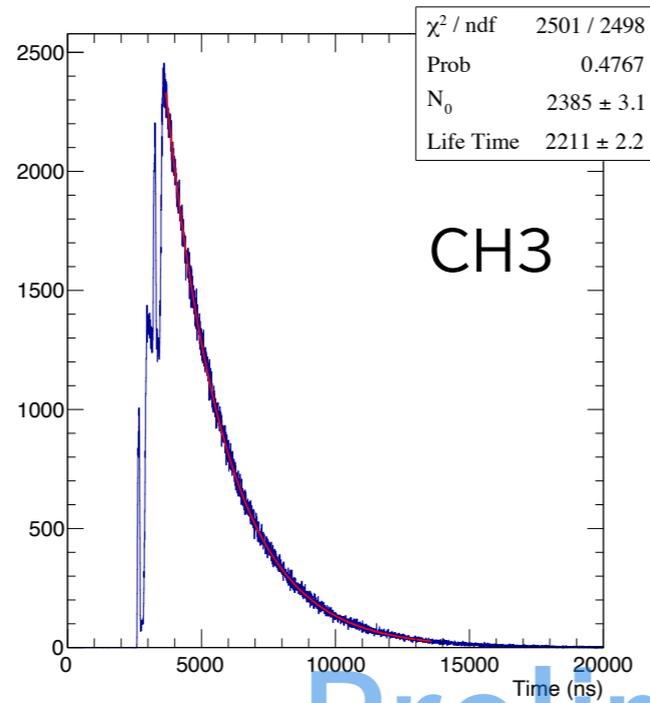
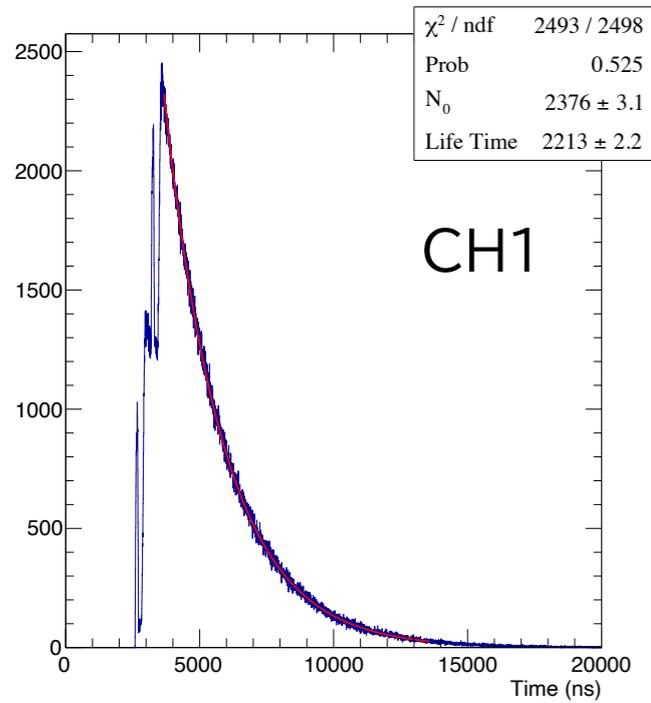
Waveform Analysis

Pulse-synchronized noise (~ 1 GHz, ~ 30 mV)



Time Spectra (AC-LGAD)

~30,000 pulse



Preliminary

レートに関する考察(直下流)

ミュオン崩壊陽電子の平均カウント数

- 45 count/pulse

AC-LGAD立体角

- S1分光器の約2倍
(より過酷)

- S1分光器はCoincidenceを取って12 count/pulse
 - ◆ S1分光器はテレスコープでサンプル以外からの陽電子をほぼ見ない
 - ◆ 時間スペクトルはかなり歪む

	S1 spectrometer	AC-LGAD
Segment Size	120 mm ²	1 mm ²
Distance from Sample	< 160 mm	~ 1mm

45 count/pulse時の冒頭のパイルアップ確率

- 2 ns pulse width | 0.08% (10Gイベントでみえるかも?)
- 40 ns pulse width | 19.8% (S1分光器)

ピクセルタイプのAC-LGADでさらに高レート耐性向上も期待

究極の高レート耐性

ミュオンflux @ H-line

- $1.6 \times 10^8 \mu^+ / s = 5.6 \times 10^6 \mu^+ / \text{pulse}$ (25Hz beam, 1 MW Operation)
- 磁場収束でほぼ全陽電子をカウント
 - ◆ あるいは試料にほぼ密着状態の場合
- スピン偏極で上流2/3、下流1/3の割合
- (究極)磁場16 Tで崩壊陽電子の軌道直径22 mm
 - ◆ 上流では $\phi 44$ mm領域に $3.7 \times 10^6 e^+ / \text{pulse}$ が飛来
- 分布が一様だと仮定すると
 - ◆ 1mm角シンチ 2,400 hit/pulse
 - ◆ 100 μm 角pixel 24 hit/pulse
 - * 最大11 MHz
 - * 検出器pulse width 2 nsでパイルアップ確率 0.02%
5 ns 0.15%
40 ns 12.5 %
- データ転送は25Hzで可能

つまり、検出器(回路)要求

取得データ

- TDCのみ (TOTは欲しい)

時間分解能

- $< \text{数}100 \text{ ps}$

信号処理

- $< 2 \text{ ns}$

信号処理 + TDC の開発で
協力求む

取得時間

- $30 + \alpha \mu\text{s}$ (16 bit)

その他の要求は設計次第(検討中)

Summary & Prospects

大強度ミュオンビーム対応高速検出器の候補

- AC-LGAD
- SiGe

AC-LGAD(1 mm角)のS1ビームテスト

- 現在の普段の分光器より(かなり)過酷な環境で測定
- 時間スペクトルに歪みなし
- 細分化でより高レート耐性向上も期待

今後の目標

- 実験に使うAC-LGADセンサーデザイン(ピクセルタイプ)
- 読み出し回路の開発