

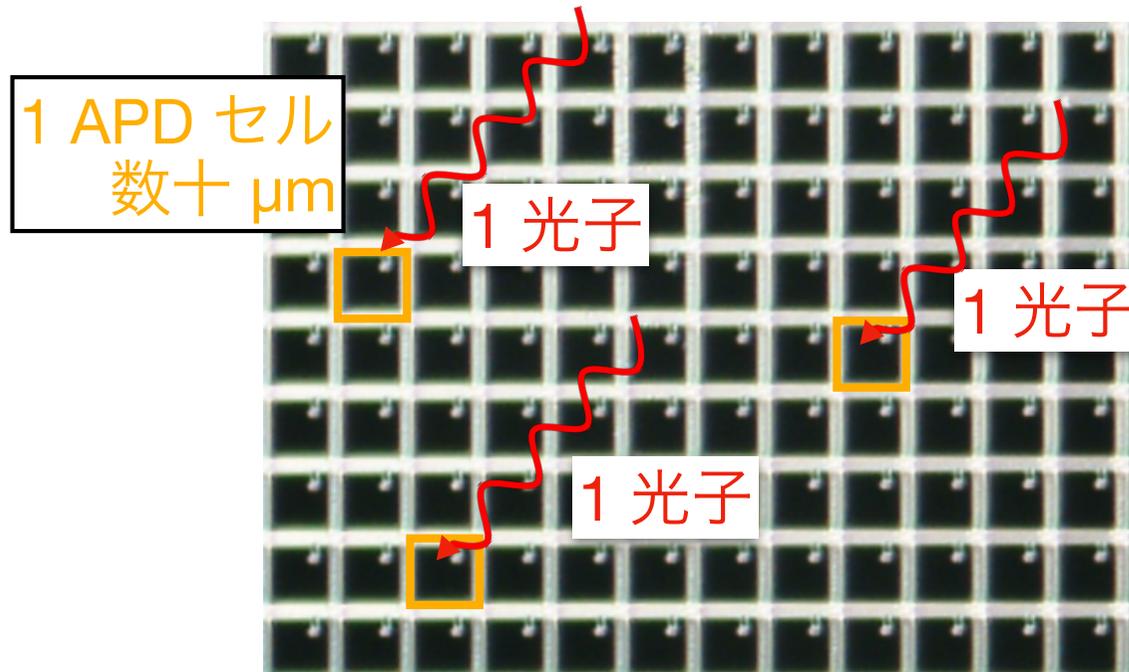
SiPM 暗電流の長期的変動と APD セルの発光の研究

名古屋大学 宇宙地球環境研究所 ^A, 名古屋大学 素粒子宇宙起源研究所 ^B
河原崎琉 ^A, 奥村暁 ^{A,B}, 田島宏康 ^{A,B}, 古田和浩 ^A

日本物理学会第 79 回年次大会 2024/9/18

Silicon Photomultiplier (SiPM)

SiPM 一部拡大図



各 APD の和が出力される

出力：3 光子

- アバランシェ・フォトダイオード (APD) セルを並べた光子検出器
- 降伏電圧 (V_{br}) 以上の動作電圧でガイガーモードで使用する
- 近年、光電子増倍管に代わる光検出器として使用される

本研究に至った経緯

背景

- 次世代ガンマ線望遠鏡 Cherenkov Telescope Array Observatory (CTAO) で焦点面カメラに SiPM を採用する
- 大量の SiPM が 30 年以上にわたって使用される
- 安定性と故障率の評価のため、**長期にわたる多チャンネルの暗電流測定**を実施した

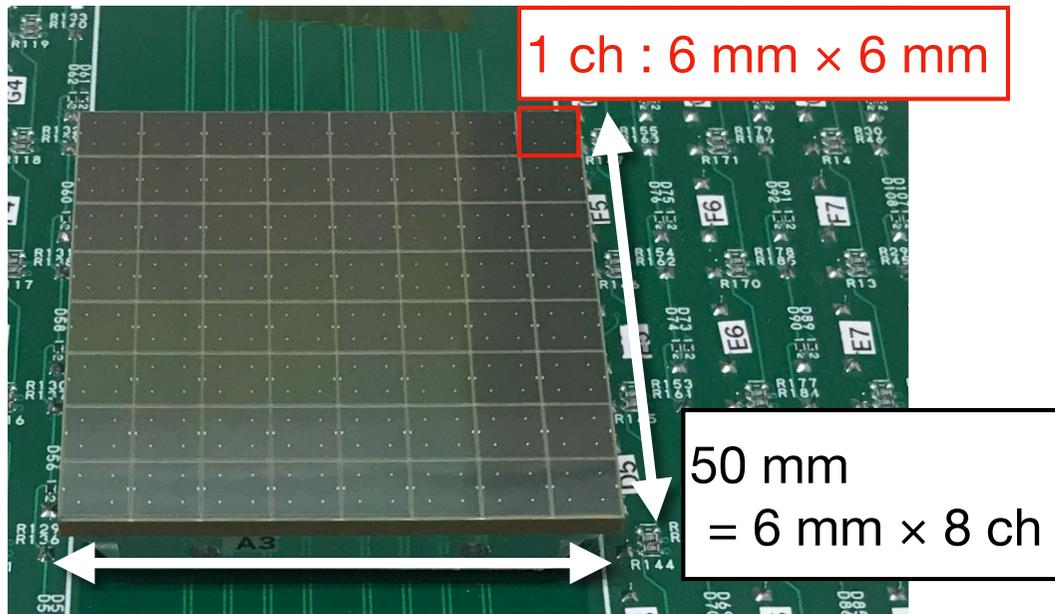
動機

- ❖ 暗電流の予想外の変動を発見した
- ❖ CTAO に影響がない小さな変動だが、興味深い現象だったため詳細な調査を行った

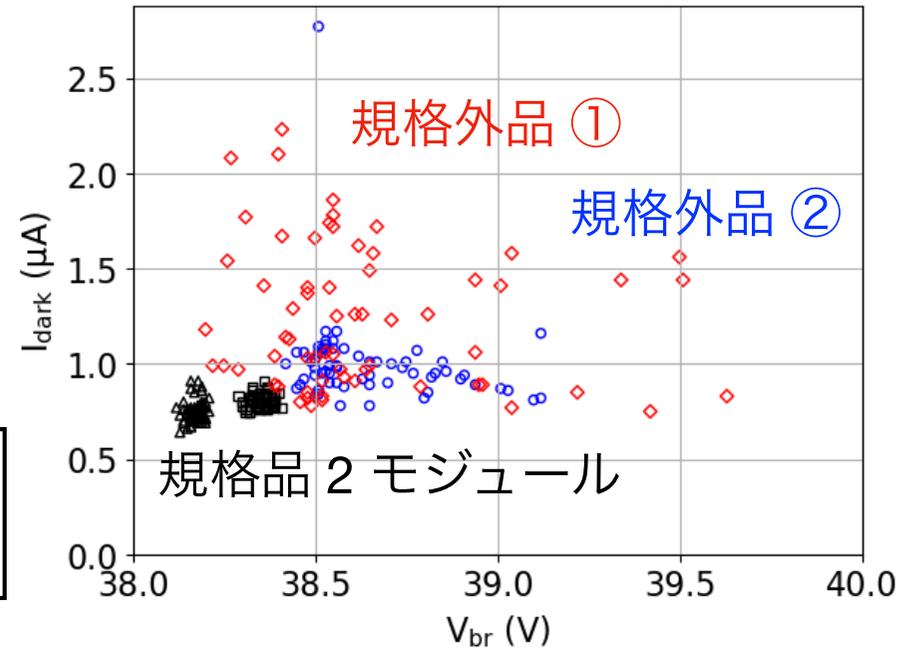
数日わたる暗電流の異常な状態とその原因部分について報告する

測定した SiPM モジュール : S14521-1720

1 モジュール : 8 × 8 ch のアレイ型



浜松ホトニクス測定 ($V_{br} + 3.0 V$)



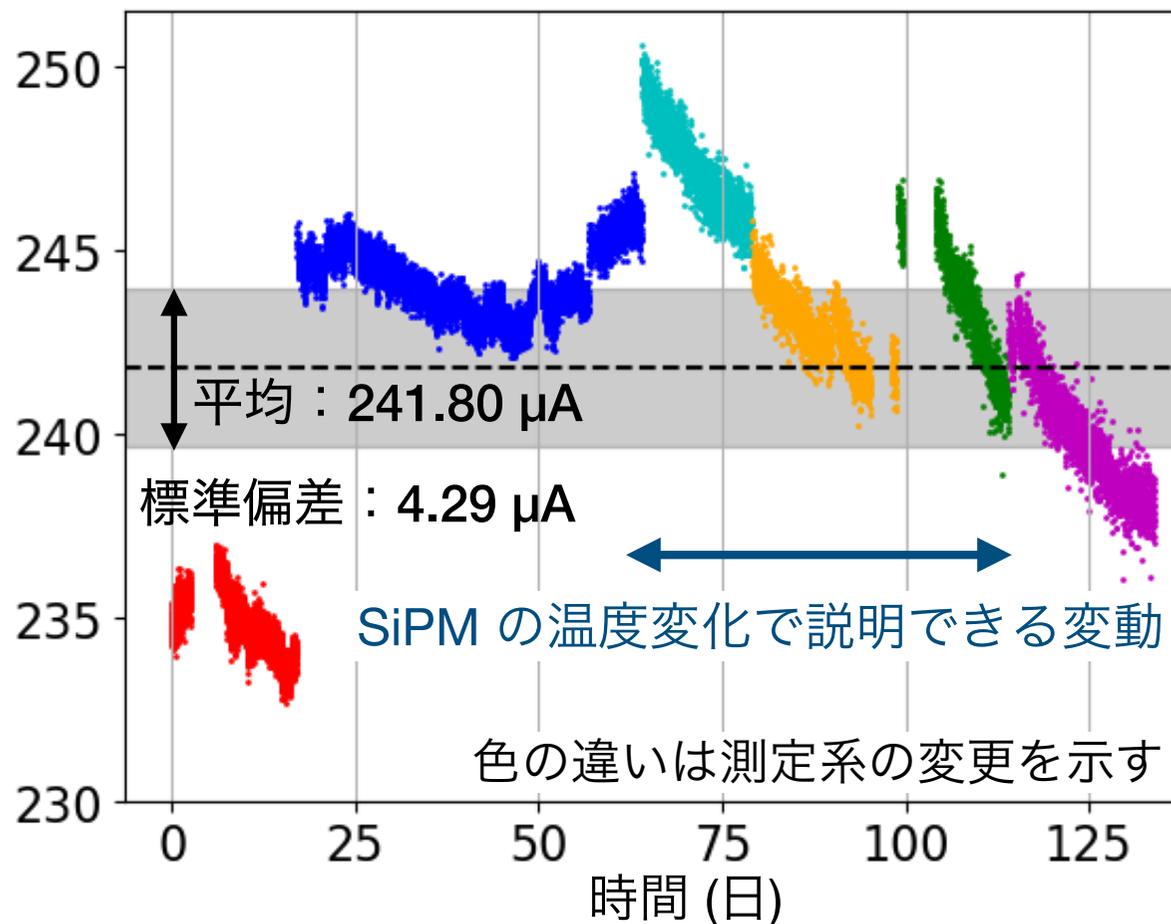
- モジュール内の ch の V_{br} が不揃いの規格外品 2 モジュールを測定した (合計 128 ch、個別 ch の性能は合格品と同等である)
- 紫外～可視 (300 ~ 900 nm) に感度を持つ
- APD セル : 50 μm

暗電流の長期測定の実験条件

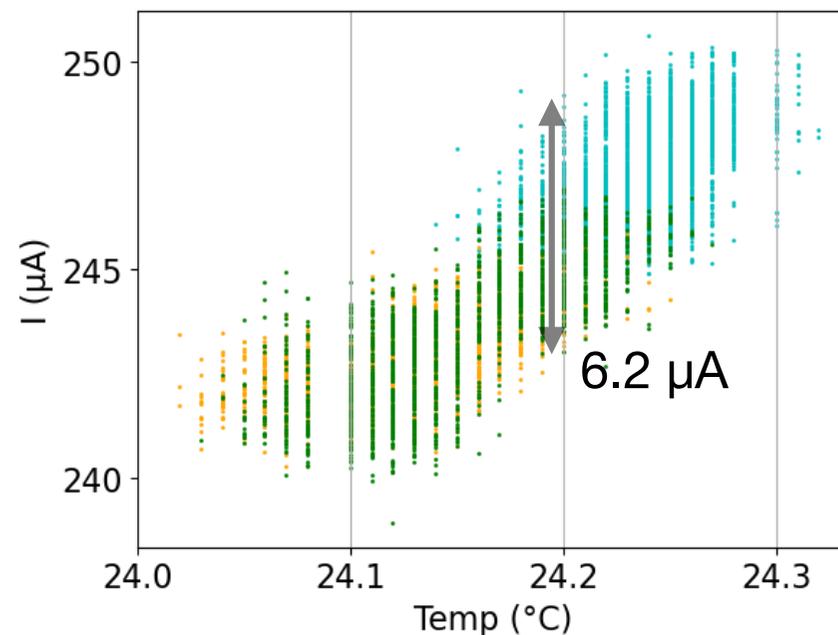
- ❖ 印加電圧 44 V = V_{br} (~ 38.5 V) + ~ 5.5 V
- ❖ 恒温槽で試験 (25°C)

1 モジュールの暗電流の安定性

暗電流 (μA)



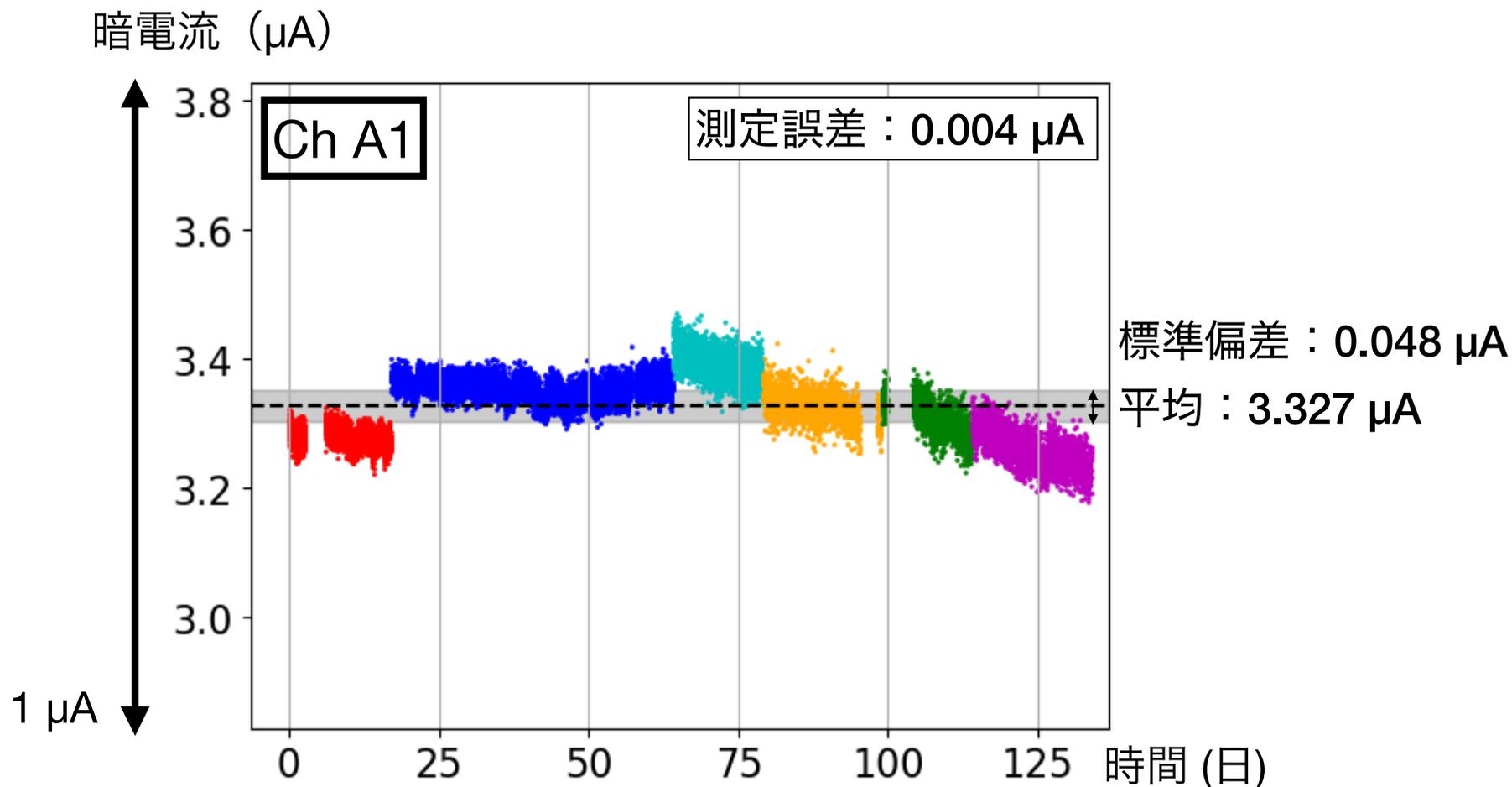
温度と電流値の相関



不良の 2 ch を除く 62 ch の合計

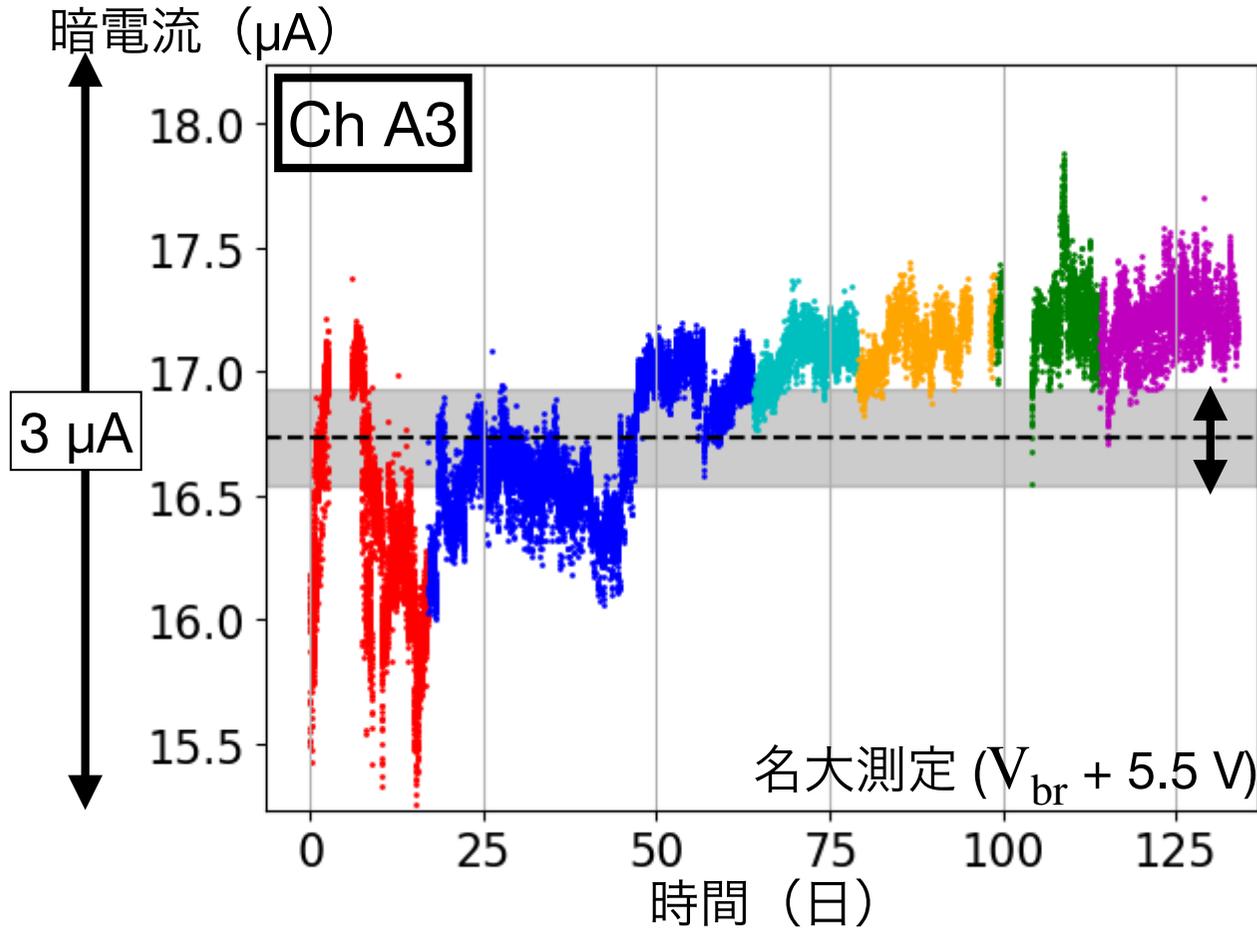
- 温度に依る変動と系統的な変動込みで 1.8% で安定している
- 連続測定では温度変化と良い相関がある
- 同一温度で約 6 μA 変動幅がある

個別 ch の暗電流の安定性



- 1 モジュール合計の変動と全体的に似た傾向がある
- 変動は全測定期間で 1.4% と小さく、安定している
- Ch A1 を標準的な ch として他チャンネルと比較する

暗電流の大きいチャンネル



標準 ch (A1)

標準偏差：0.048 μA

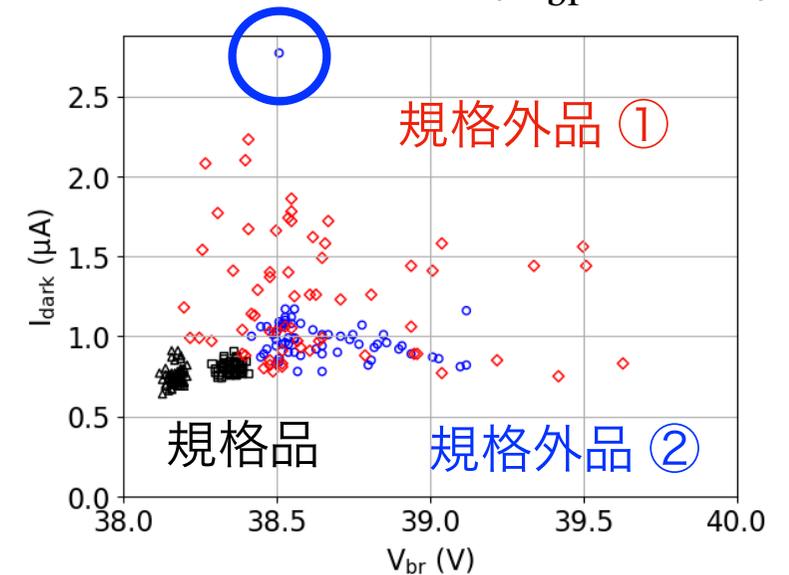
平均：3.327 μA

標準偏差：0.393 μA

平均：16.735 μA

5倍

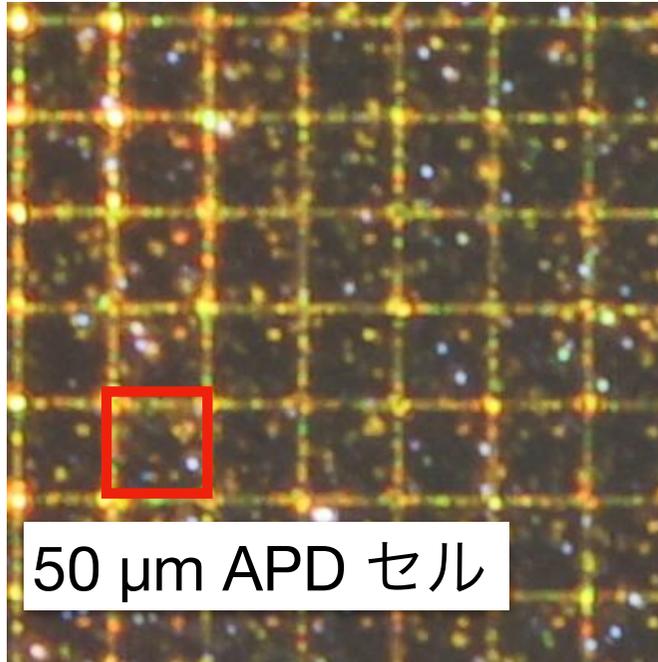
浜松ホトニクス測定 ($V_{br} + 3.0 \text{ V}$)



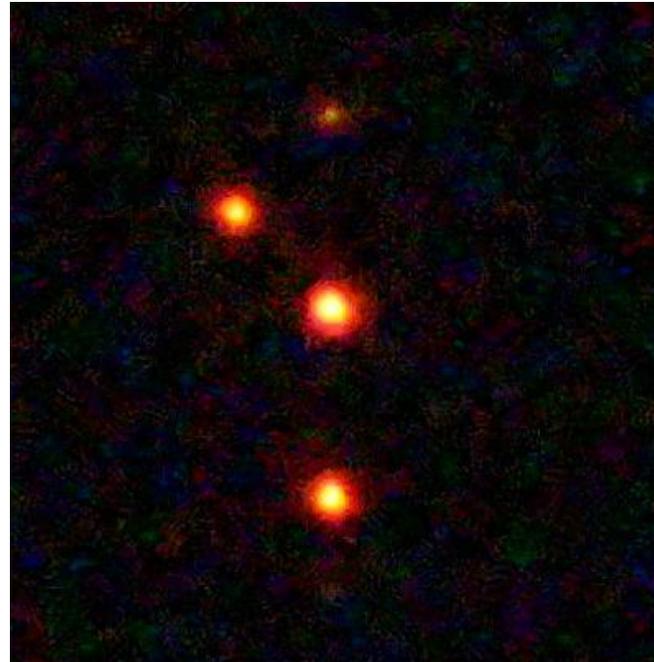
- 暗電流の値と変動が大きい ch が含まれる
- 1 モジュール合計の変動と異なる変動をする
- 規格外品のスクリーニング済みの ch である
- 仮説：特定の APD セルで電流増大している → Si の脱励起の光が見える

SiPM 表面の輝点撮影

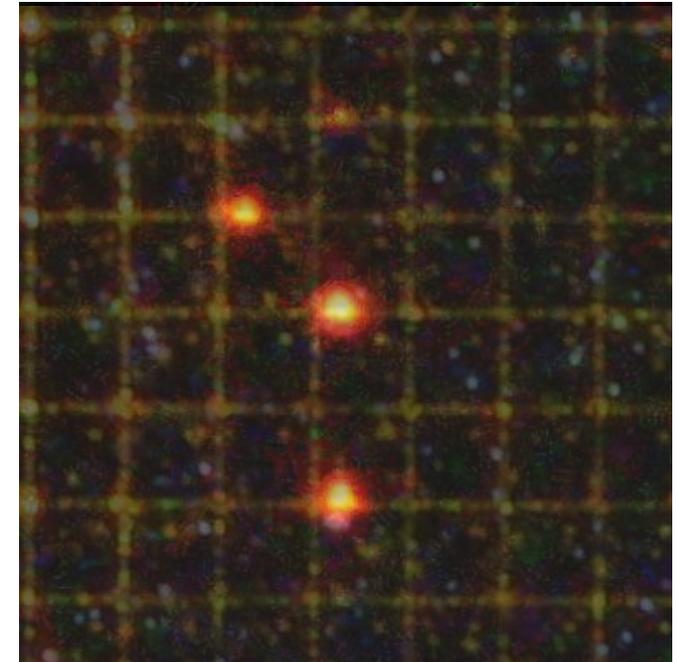
室内灯下で撮影 (HV off)



暗室で HV 44 V を印加

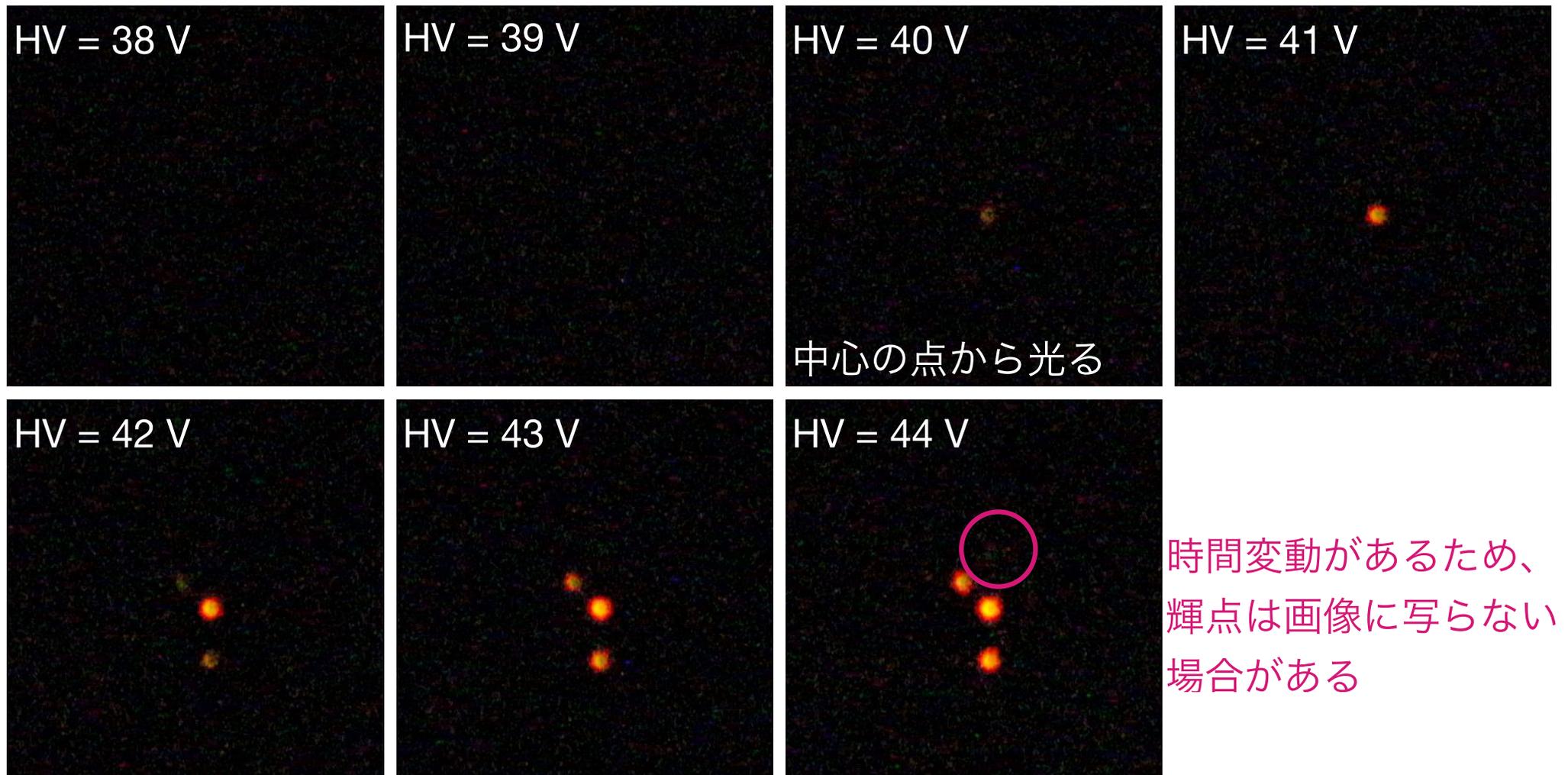


重ねて比較



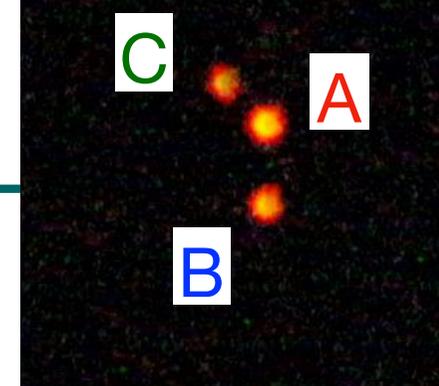
- SiPM 表面を一眼レフカメラで撮影した
- Ch A3 の APD セルのみ、4 つの輝点が恒常的に写った
 - * 4 点が近接している
 - * 全て APD セルの角が発光する
- 輝点の APD セルが電流増大を担うか検証するため、輝度と電流の関係を調査する

輝点の明るさの変動

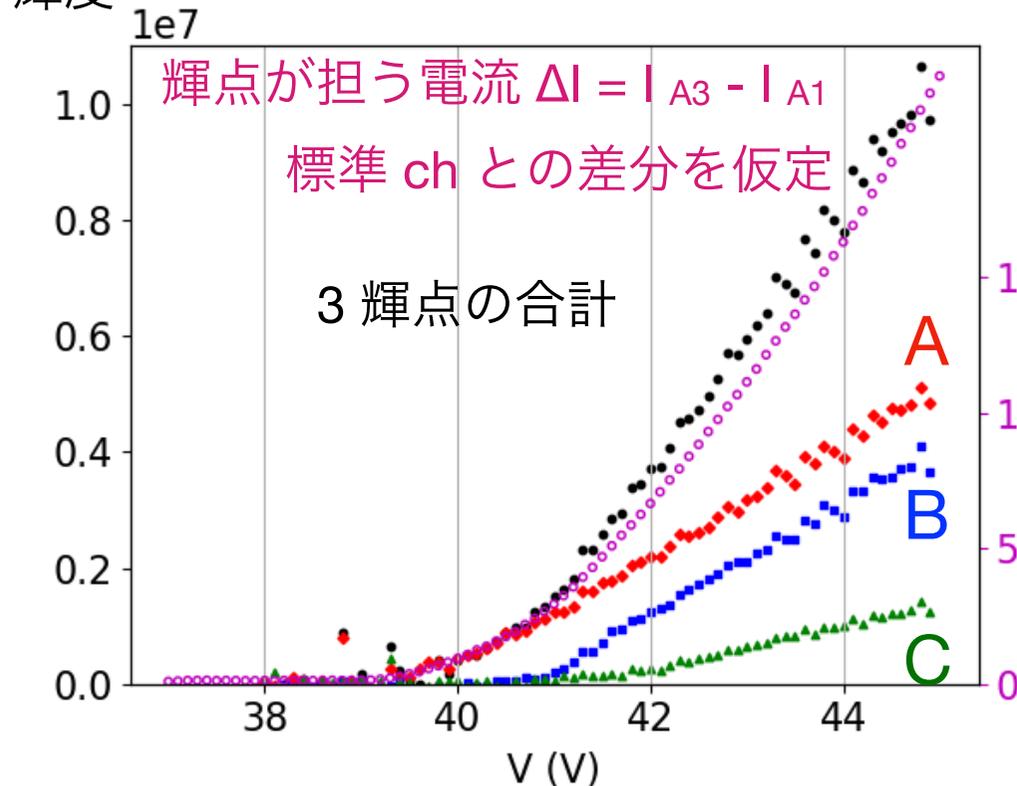


- 印加電圧を変えると輝点の明るさが変化した
- 輝点ごとに明滅が異なる

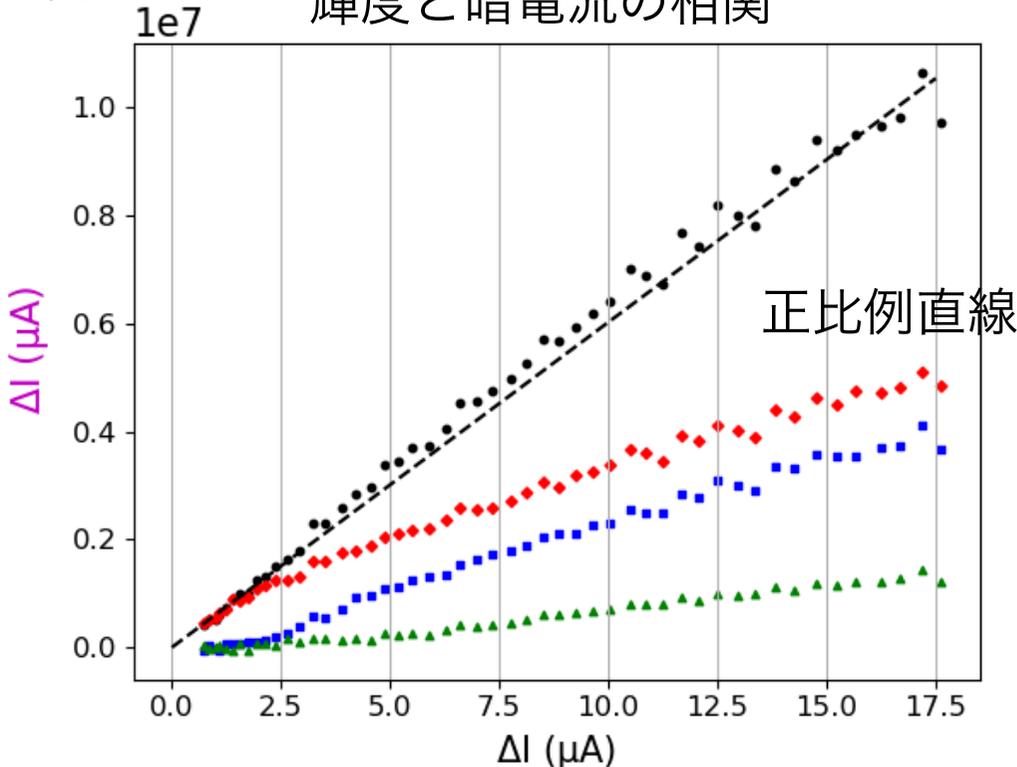
暗電流と輝点の明るさの関係



輝度と暗電流の電圧依存性

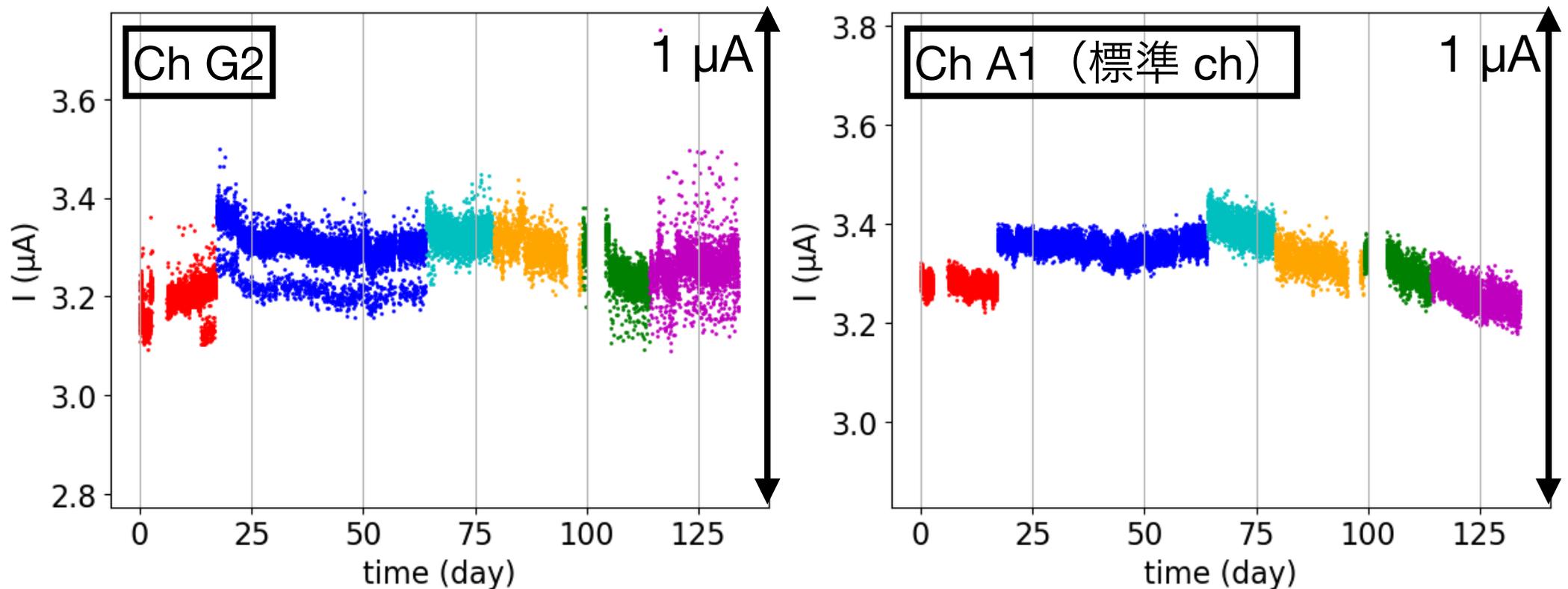


輝度と暗電流の相関



- APD セルごとに発光が始まる電圧が異なる
- 3 輝点合計の明るさと超過電流はおよそ正比例の関係がある
- 輝点が見える APD セルが電流増大を担っている

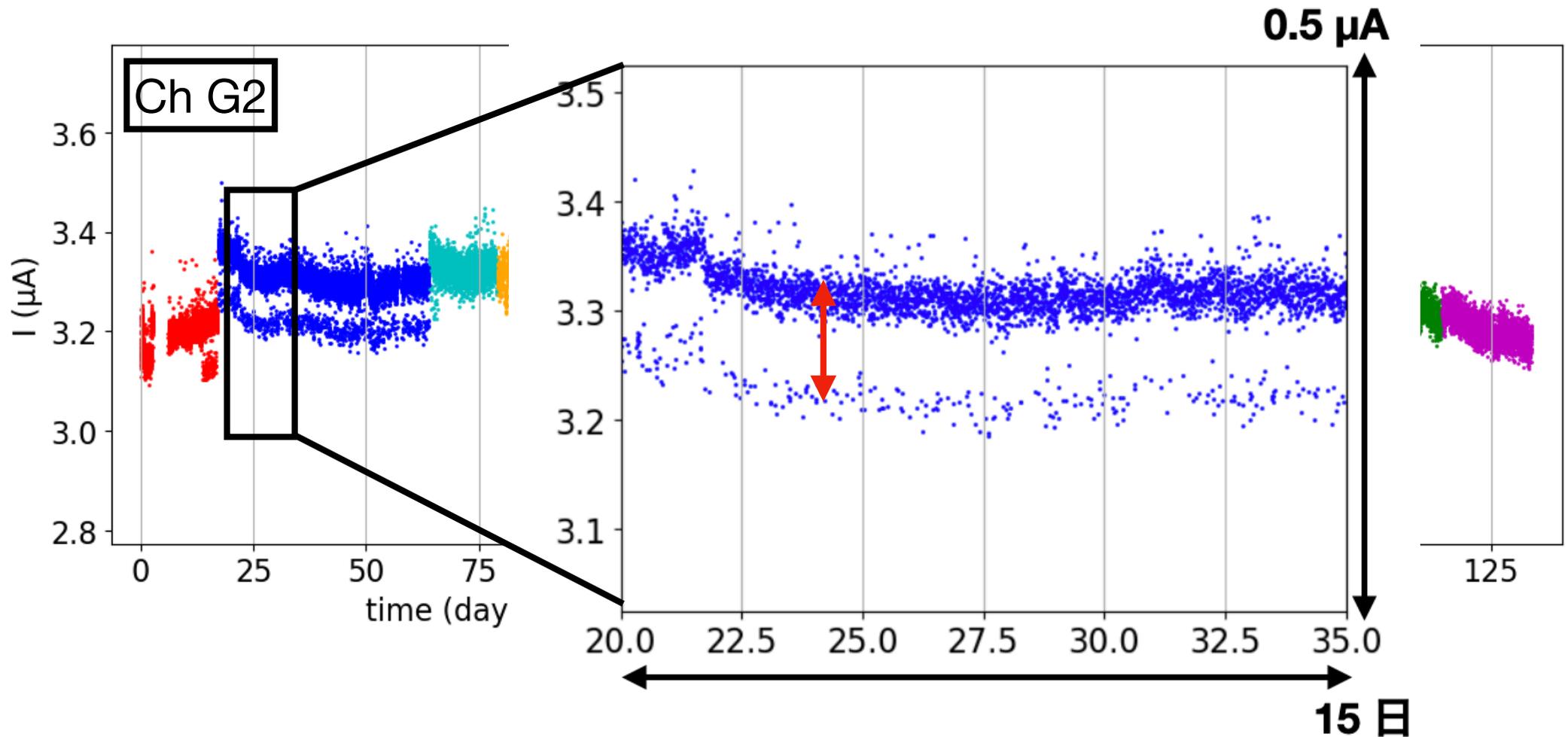
バイモーダルな暗電流の「遷移」



128 ch の個別の振る舞いを 2 つに分類した

1. 暗電流が遷移するチャンネル : 48 ch / 128 ch
2. 暗電流が遷移しないチャンネル : 80 ch / 128 ch

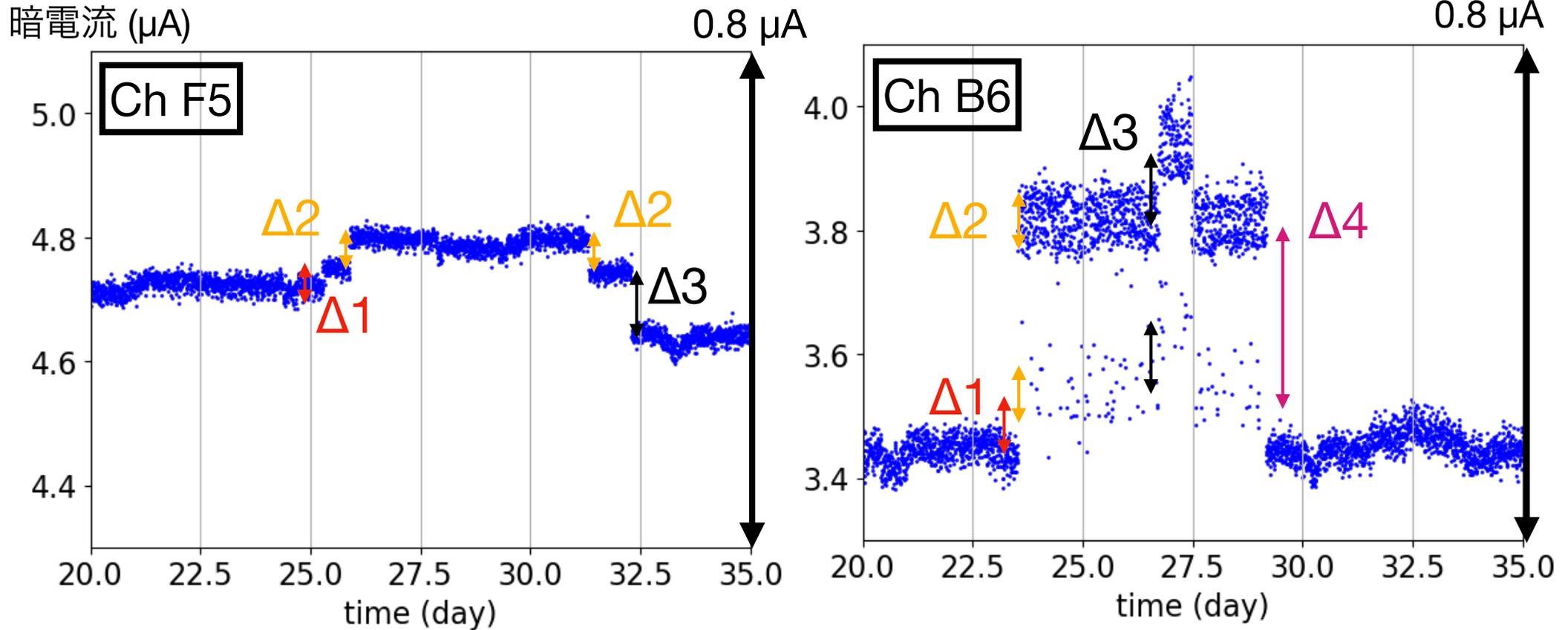
バイモーダルな暗電流の「遷移」



128 ch の個別の振る舞いを 2 つに分類した

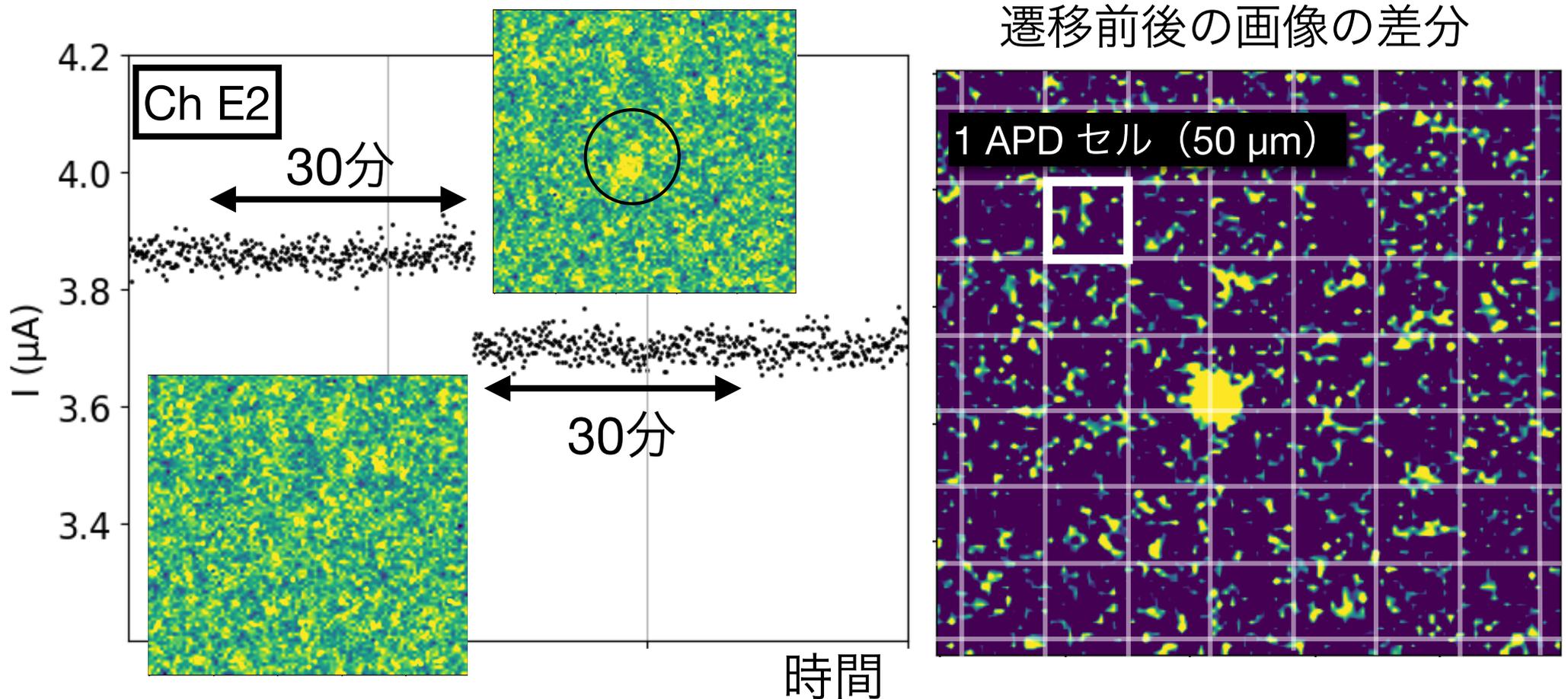
1. 暗電流が遷移するチャンネル : 48 ch / 128 ch
2. 暗電流が遷移しないチャンネル : 80 ch / 128 ch

マルチモーダルな遷移



- 電流遷移は各 ch で複数の種類が発生することもある
- 遷移の幅、頻度、時刻は ch ごと異なるため、外的要因ではない
- 仮説：特定の APD セルに流れる電流が一時的に増減している

暗電流の遷移と輝点の明滅



- 露光時間を 30 分に増やすことで微弱な輝点を撮影した
- 大電流 ch (A3) と異なる ch でも APD セルの角が発光していた
- 電流の遷移時刻に輝点が明滅する
- マルチモーダルな「遷移」は特定の APD セルが引き起こされる

まとめと考察

まとめ

- 暗電流が数日に渡る期間で変動する
 - * マルチモーダルな「遷移」を発見した
- APD セルの角の輝点で電流増大が説明できる
 - * 電流の大きい ch A3 でもパルス測定はできている
- 特定の複数の APD セルで電流が増減し、マルチモーダルな遷移を引き起こす

考察

- APD セル角の物理的構造で電場が増強されている
- 近隣の複数 APD セルで輝点が同時に発生しやすくなる