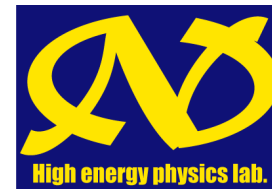




名古屋大学
NAGOYA UNIVERSITY



Belle II 実験環境における 角型MCP-PMTの増幅率変動 に関する研究

名大理^A, 名大KMIB^B

児島 一輝^A, 飯嶋 徹^{A,B}, 居波 賢二^A, 鈴木 一仁^A, 松岡 広大^B,
前田 陽祐^B, Alessandro Gaz^B, Dmitrii Neverov^A, 都築 識次^A,
室山 玄太^A, 奥藤 陸矢^A, 千賀 智史^A, 平田 光^A, 山之内 丈^A
他 Belle II TOPグループ

概要

導入

- Belle II 実験
- TOPカウンター
- 光検出器 MCP-PMT

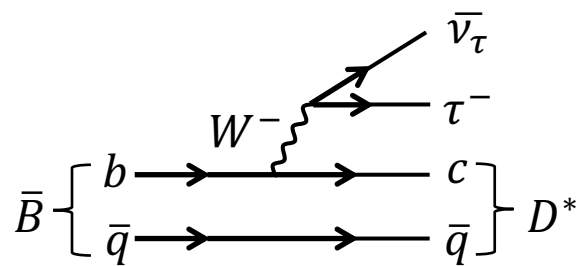
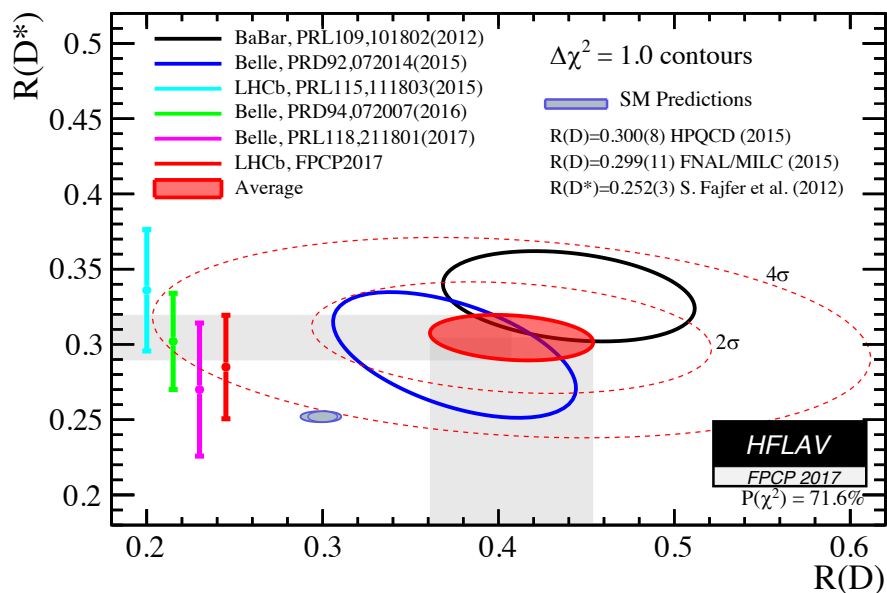
実験

- 研究目的
- レーザーを用いた増幅率測定（テストベンチ／実機）
- 増幅率の温度依存性測定
- 高ヒットレート時の増幅率測定

結論

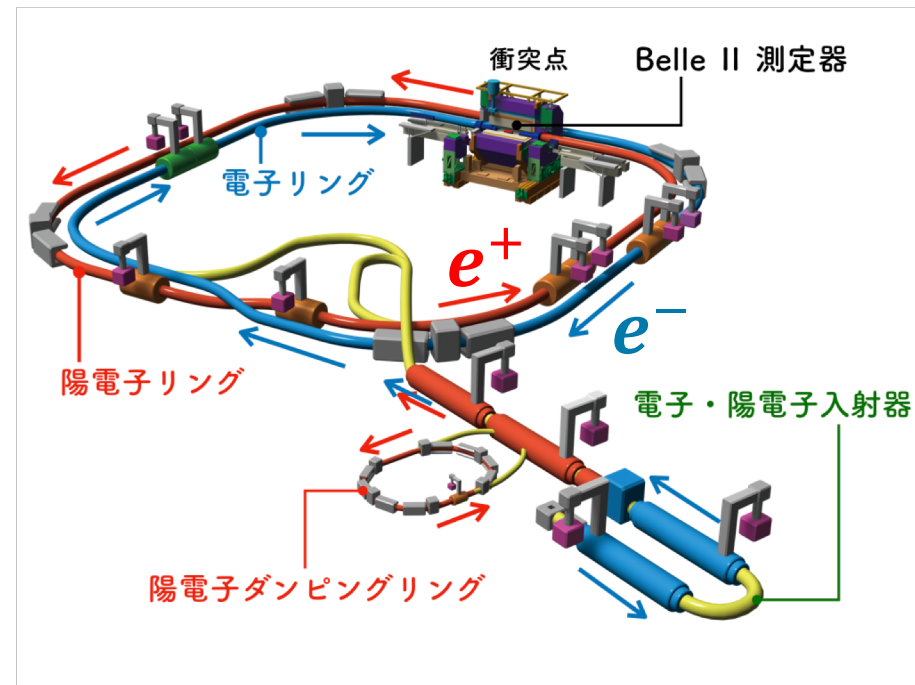
- 今後の展望
- まとめ

SuperKEKB / Belle II 実験



「標準理論」と約 4σ の差

$$R(D^{(*)}) = \frac{\mathcal{B}(B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu)}{\mathcal{B}(B \rightarrow D^{(*)} l \nu)}$$



KEKB加速器の40倍の衝突性能 (ルミノシティ) $8.0 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

⇒ 今後10年で積分ルミノシティ 50 ab^{-1} のデータを蓄積 (約500億個の B 中間子対)

高統計データを用いて素粒子物理学の「標準理論」を超える物理現象の発見を目指す

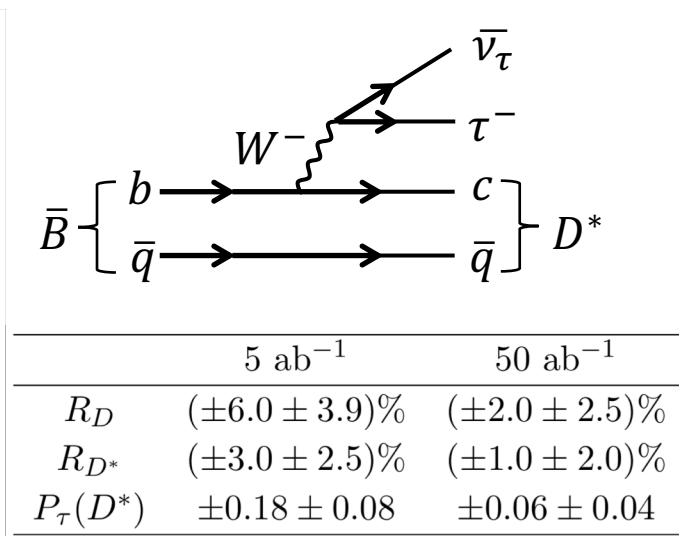
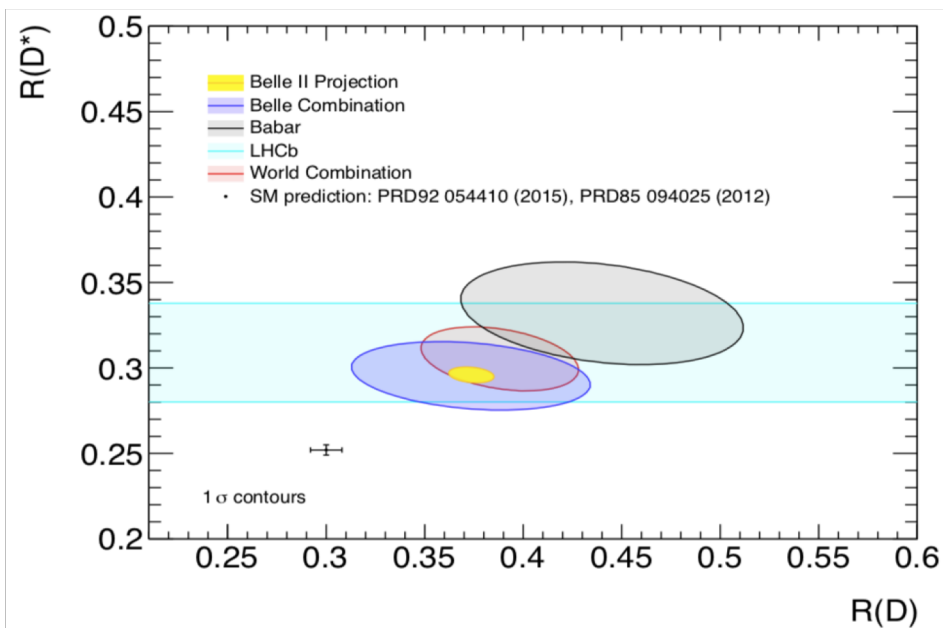
2016年2月-6月
SuperKEKB
加速器試運転

2017年4月
検出器インストール
(ロールイン)

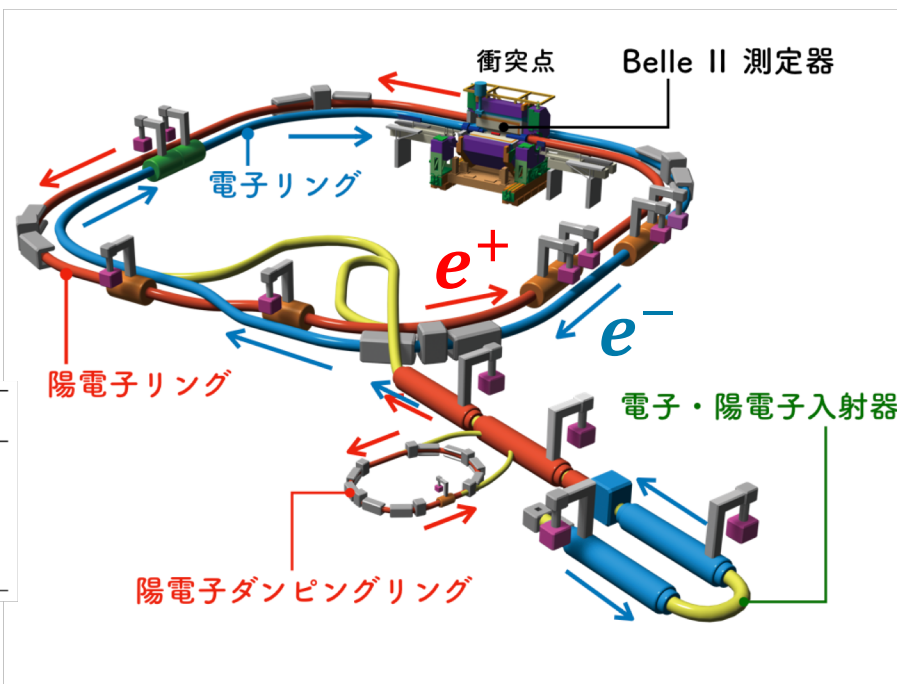
2018年4月-7月
初期衝突データの取得
(497 pb^{-1})

2019年3月-
物理ランの開始
瞬間ルミノシティの向上

SuperKEKB / Belle II 実験



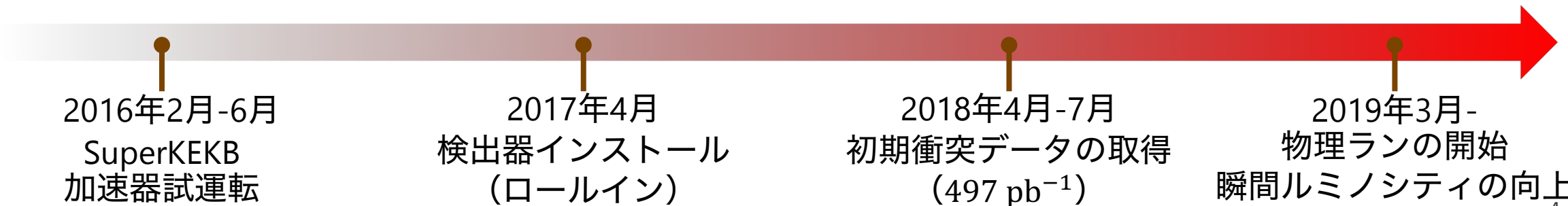
	5 ab^{-1}	50 ab^{-1}
R_D	$(\pm 6.0 \pm 3.9)\%$	$(\pm 2.0 \pm 2.5)\%$
R_{D^*}	$(\pm 3.0 \pm 2.5)\%$	$(\pm 1.0 \pm 2.0)\%$
$P_\tau(D^*)$	$\pm 0.18 \pm 0.08$	$\pm 0.06 \pm 0.04$



KEKB加速器の40倍の衝突性能 (ルミノシティ) $8.0 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

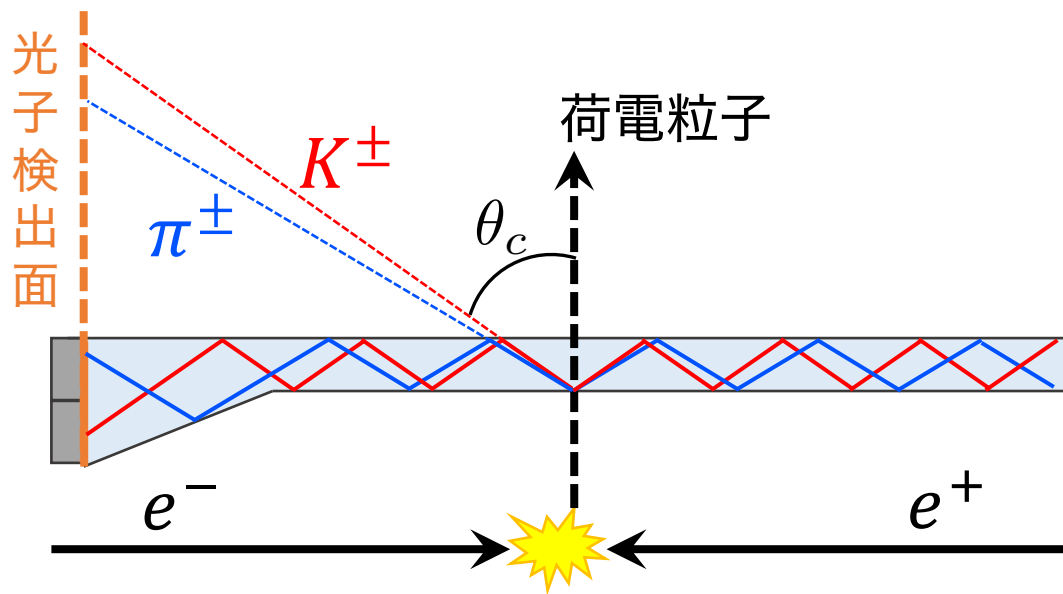
⇒ 今後10年で積分ルミノシティ 50 ab^{-1} のデータを蓄積 (約500億個の B 中間子対)

高統計データを用いて素粒子物理学の「標準理論」を超える物理現象の発見を目指す

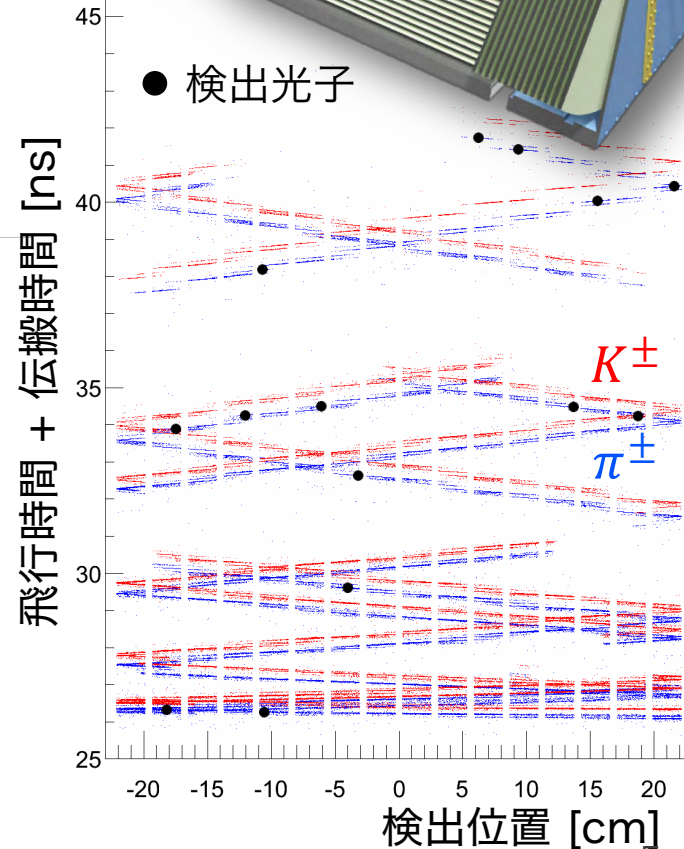
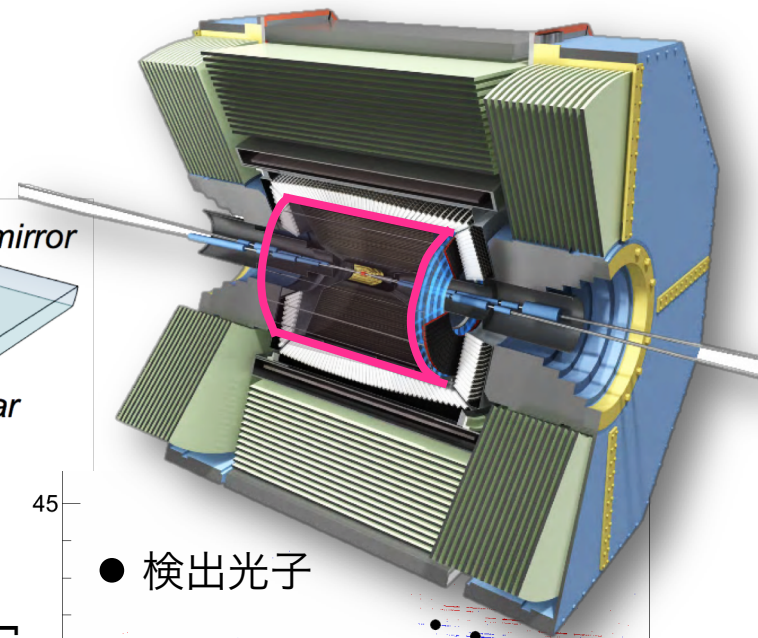
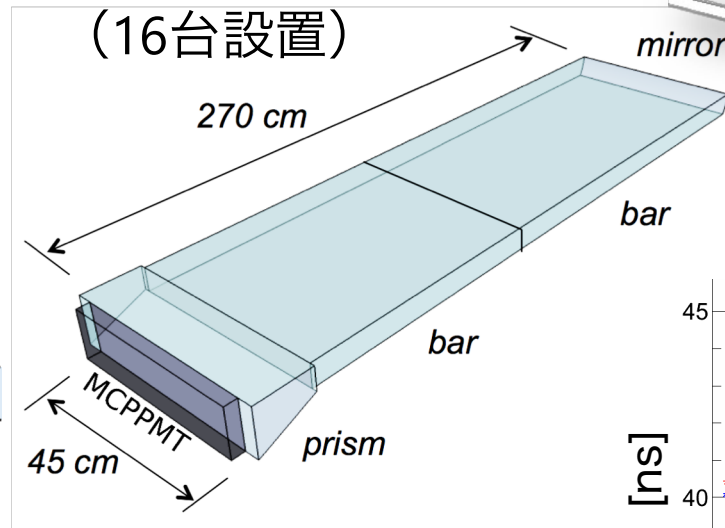


TOPカウンター

円筒部のリングイメージ型粒子識別装置



TOPモジュール
(16台設置)



チェレンコフ角 θ_c

$$\cos \theta_c = \frac{1}{n\beta} = \frac{\sqrt{m^2 + p^2}}{np}$$

$$p = 3 \text{ GeV } \pi/K$$

$$\Delta\theta_c \simeq 0.6^\circ \implies \Delta t = \mathcal{O}(100) \text{ ps}$$

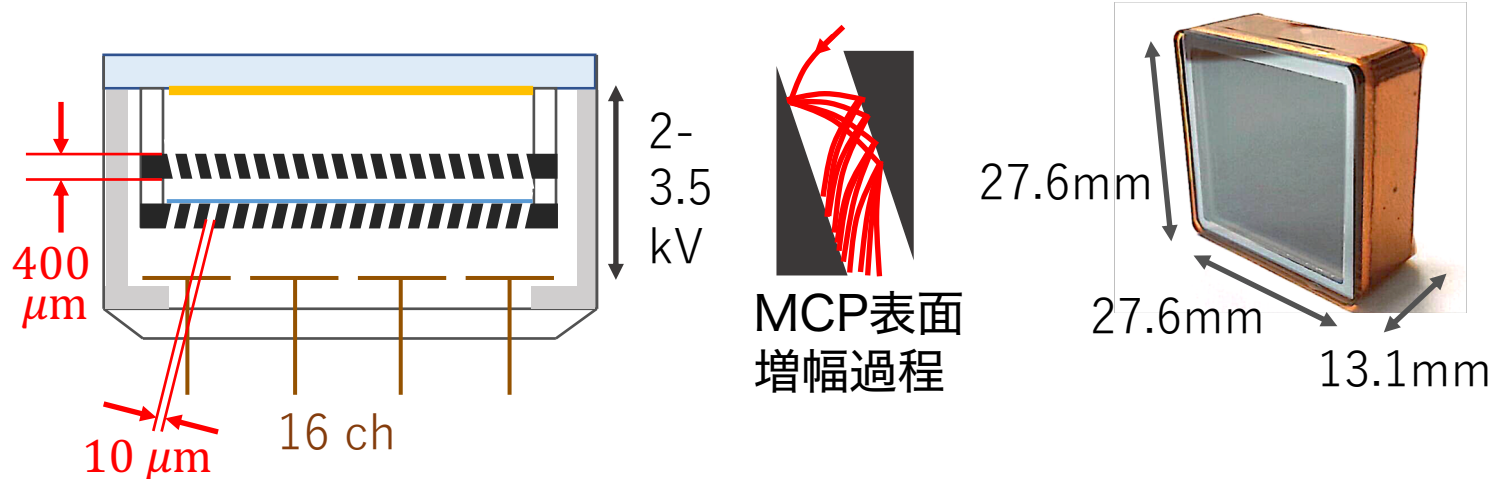
$$\text{識別能力} \propto \frac{\sqrt{\text{検出光子数}}}{\text{時間分解能}}$$

光検出器 MCP-PMT

マイクロチャンネルプレート (Micro-channel-plate, MCP) を用いた光電子増倍管

■ 性能

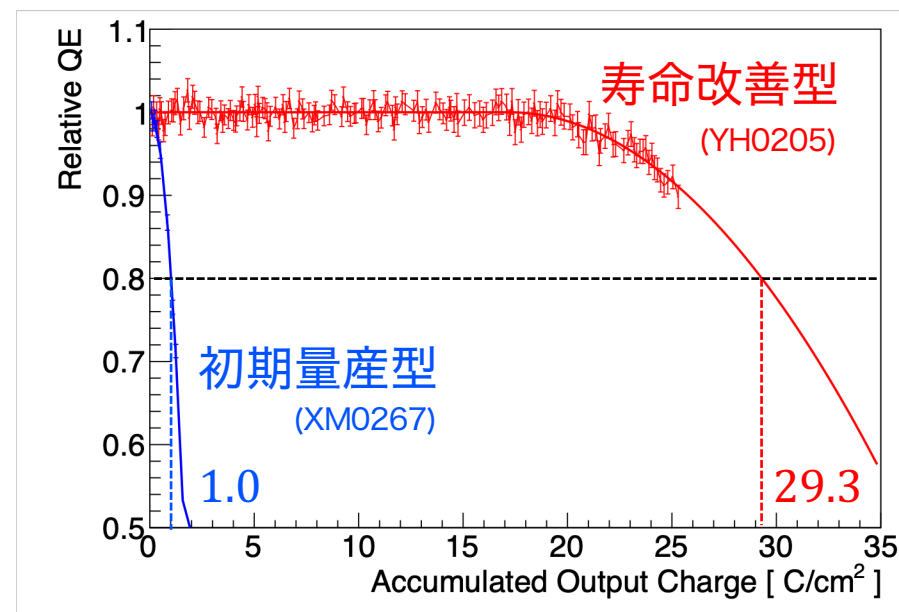
時間分解能	< 40 ~ 50 ps
増幅率	$\mathcal{O}(10^6)$
運転温度 (推奨温度)	-30 ~ +45 °C (+10 ~ +30 °C)
ピーク波長のQE	29.3 %



■ 寿命

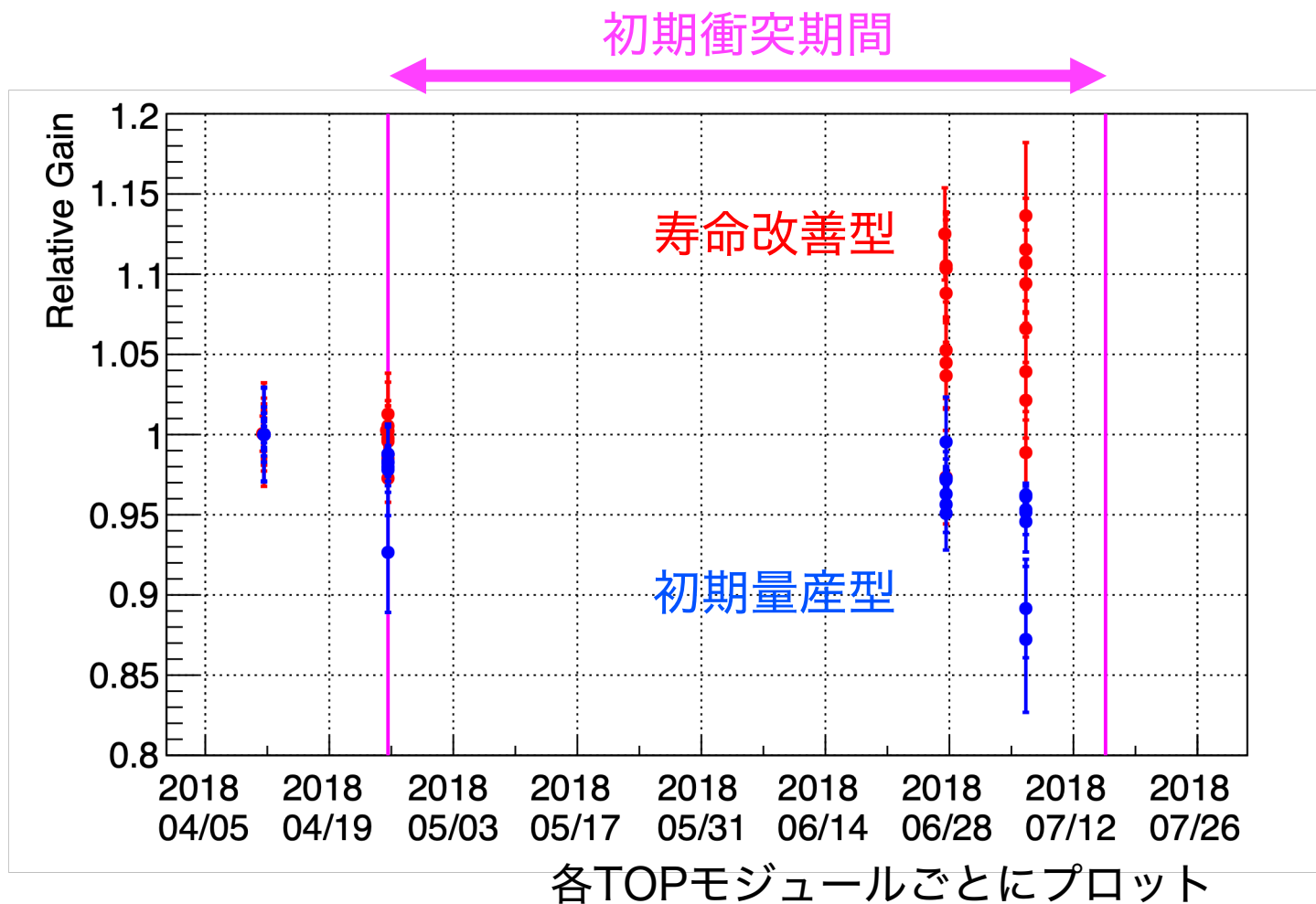
波長400 nmにおける相対QEが0.8となる積分出力電荷
マルチアルカリ光電面 (NaKSbCs)

型番	寿命	寿命対策
初期量産型	1.1 C/cm ²	Al薄膜 & セラミックブロック
寿命改善型	> 13.6 C/cm ²	ALDコーティング & 製造過程残留ガス対策強化



研究目的

2018年 4月-7月の初期衝突期間において実機MCP-PMTの増幅率変動が観測されている
(初期状態で増幅率 3.0×10^5 の電圧)



初衝突後の測定で増幅率変動が観測されている

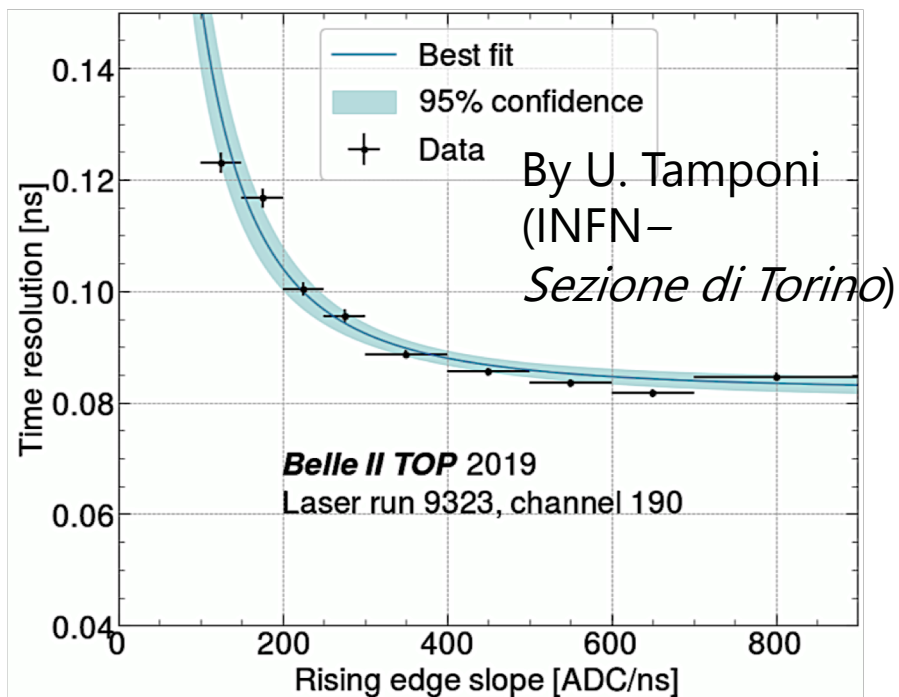
寿命改善型は増加傾向
初期量産型は減少傾向

研究目的

MCP-PMTの増幅率変動は測定に対して以下のような影響が及ぶ

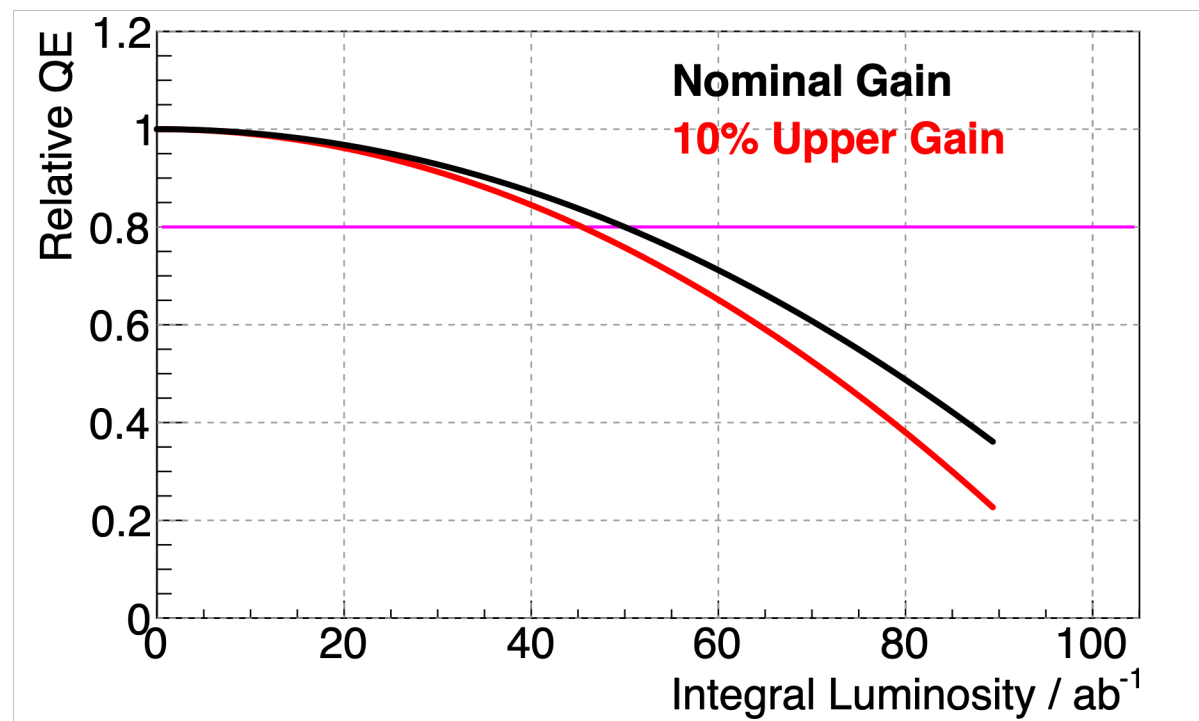
増幅率低下

波高の低下 \Rightarrow 時間分解能の低下
閾値以下の信号の増加 \Rightarrow 信号弁別効率の低下



増幅率増加

出力電荷増加 \Rightarrow 寿命低下



増幅率変動の原因を究明し、増幅率の安定動作を目指す

概要

導入

- Belle II 実験
- TOPカウンター
- 光検出器 MCP-PMT

実験

- 研究目的
- 増幅率の温度依存性測定 (テストベンチ)
- 電圧印加直後の増幅率測定 (テストベンチ)
- 高ヒットレート時の増幅率測定 (テストベンチ)

結論

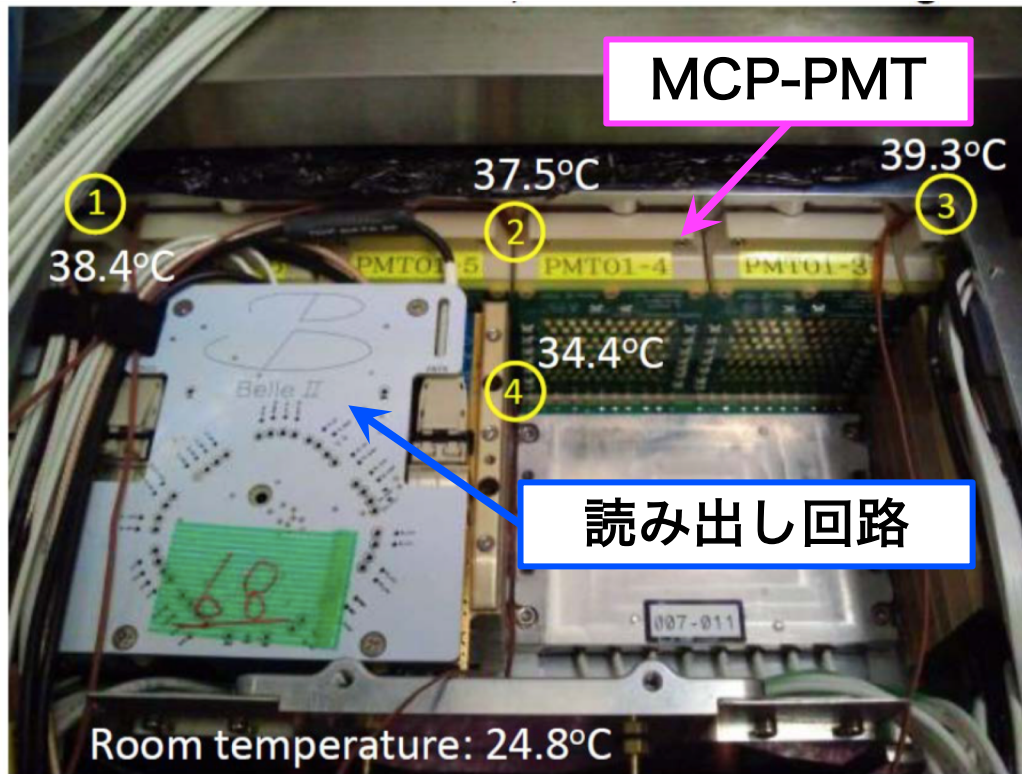
- 今後の展望
- まとめ

実機環境

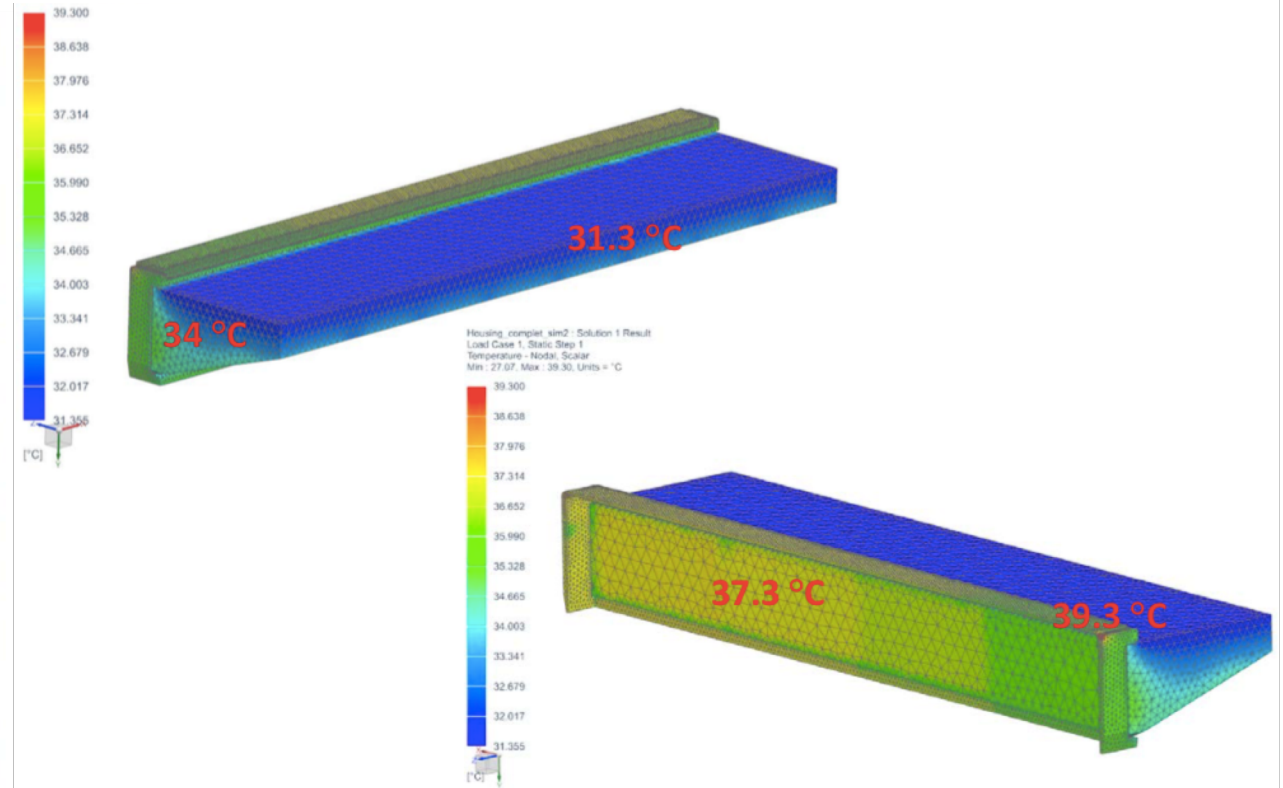
読み出し回路が熱源となり，30 °C – 40 °Cの温度環境

➡ 周辺環境の温度に対するMCP-PMTの増幅率の依存性を調査

実機測定

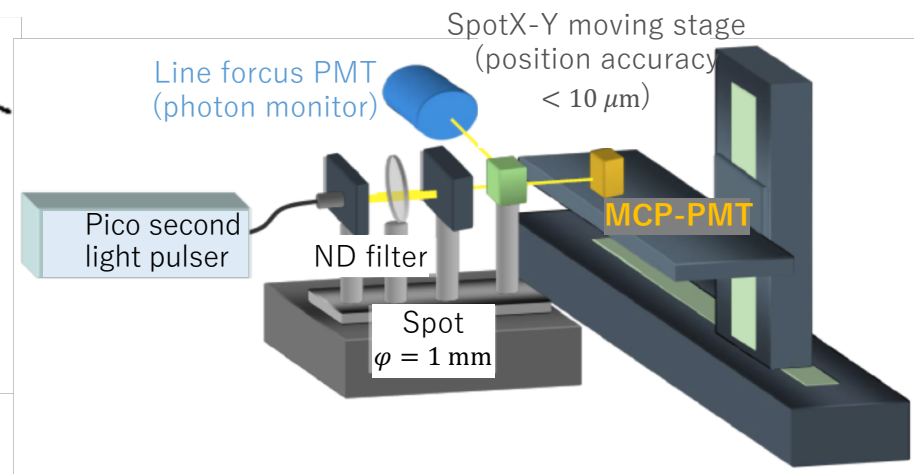
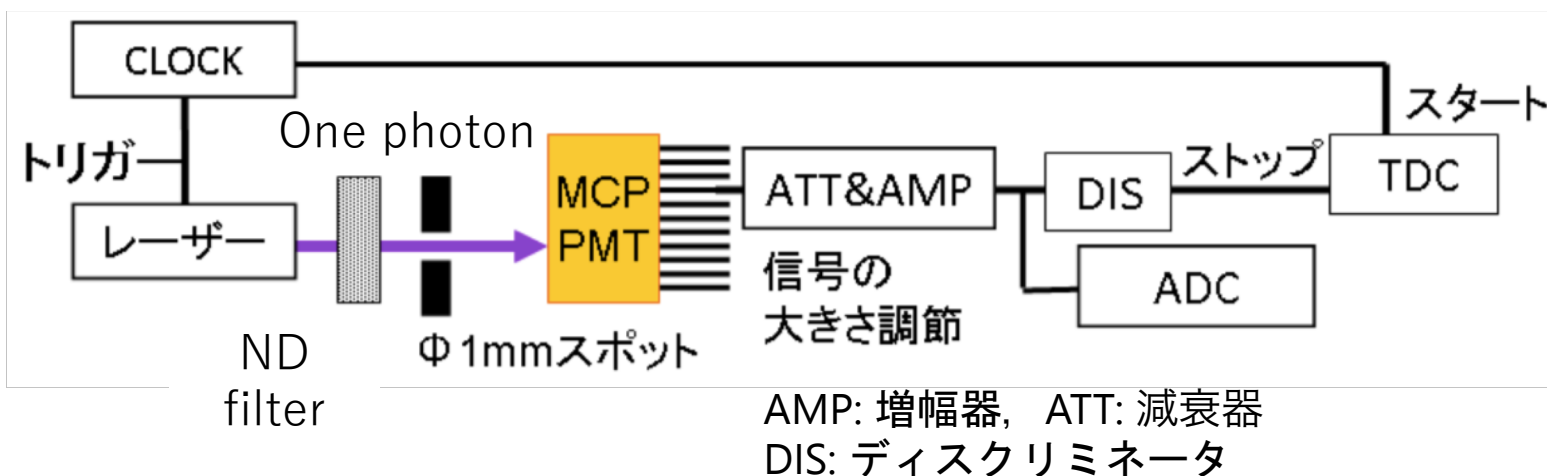


温度シミュレーション



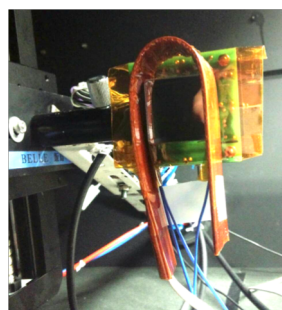
Yassin Bantanji (University of Hawaii), Gary Varner (University of Hawaii), Gerard Visser (Indiana University)

増幅率の温度依存性測定 セットアップ



温度制御

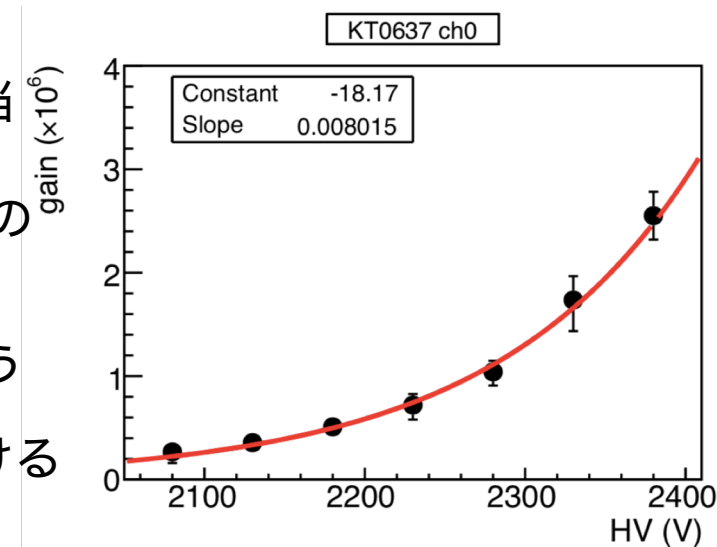
温度制御システム (ヒーター) を用いてMCP-PMTの温度を保ちながら測定を行う



⇒ 28 °C – 42 °C
熱電対で温度測定

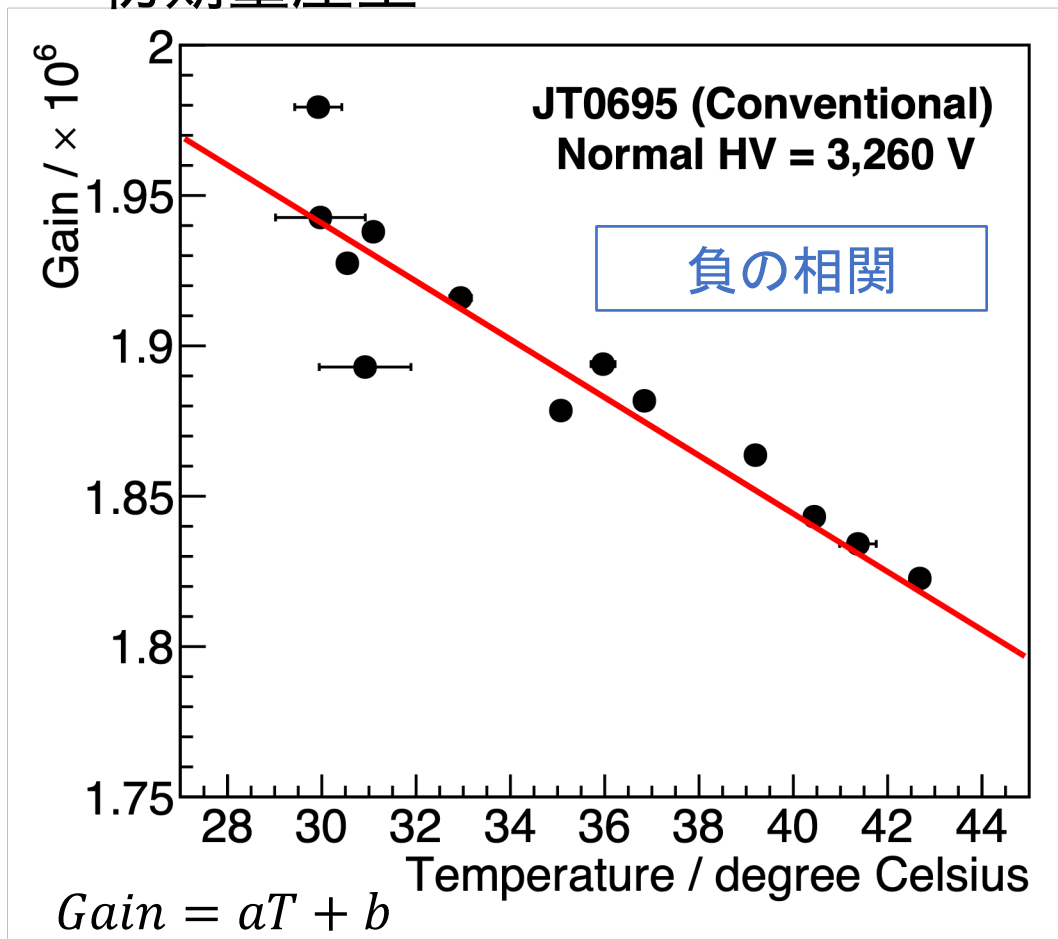
増幅率測定

1. 標準電圧 (増幅率 2.0×10^6 に相当する電圧) に対して $-200 \text{ V} - +100 \text{ V}$ の範囲で増幅率の測定を行う
2. $\exp(A \times \text{HV} + B)$ でフィットを行う
3. フィット結果から標準電圧における増幅率を決定する



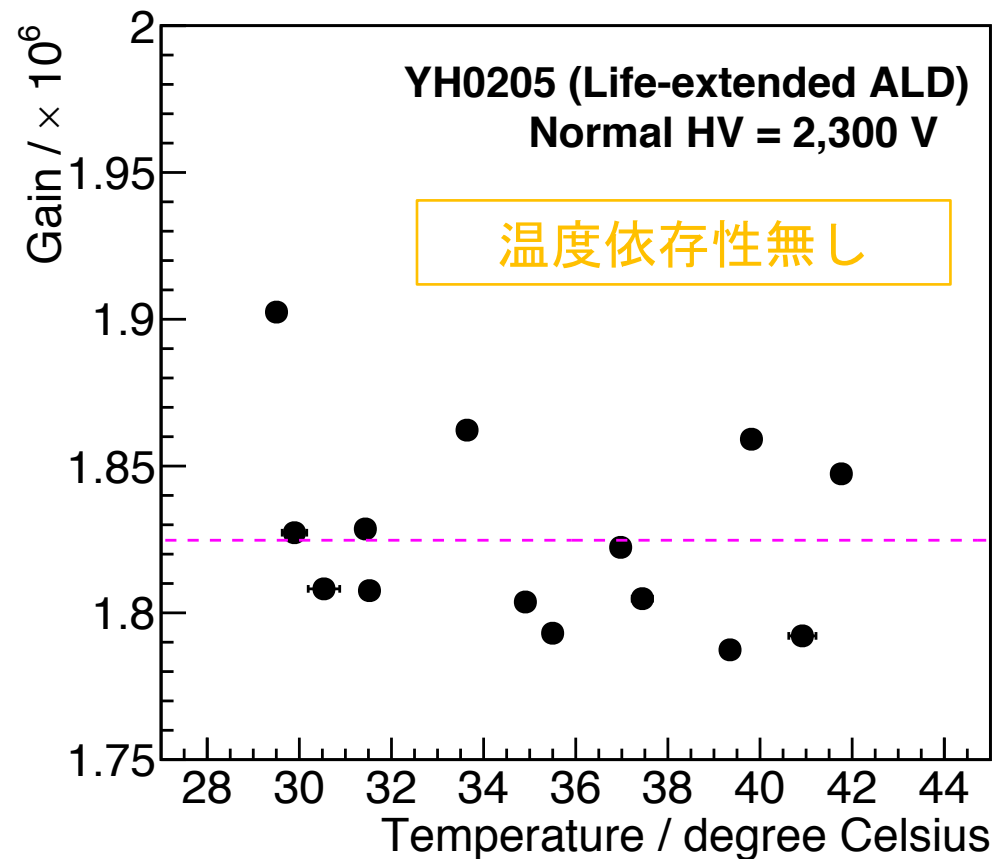
増幅率の温度依存性測定 結果

■ 初期量産型



$$a = (-9.70 \pm 0.22) \times 10^{-3}, b = 2.23 \pm 0.01$$
$$\chi^2 = 308$$

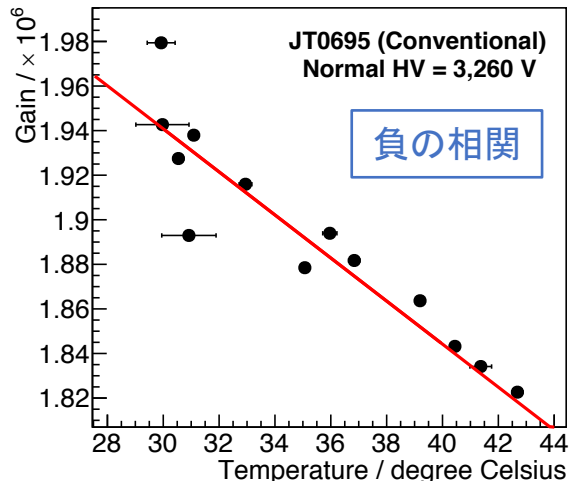
■ 寿命改善型



$$c = (3.51 \pm 0.04) \times 10^3$$
$$\chi^2 = 0.313$$

増幅率の温度依存性測定 考察

■ 初期量産型



初期量産型の実機における増幅率低下の原因としてレーザー測定時におけるMCP-PMTの温度が考えられる

➡ 実機ではフロントボードの温度を測定
増幅率との相関の有無から確認でき、今後評価を行う

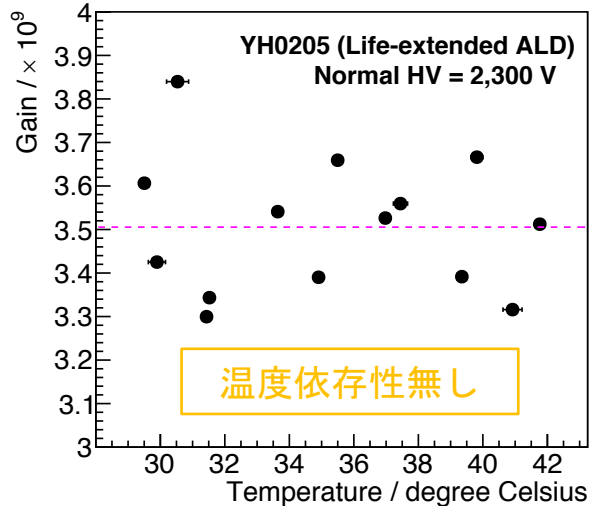
寿命改善型には増幅率の温度依存性が見られない

初期量産型と寿命改善型で異なる依存性が見えている

- 印加電圧値
 - MCPのALDコーティングの有無
 - 残留ガスの量
- } 増幅率変動に関する可能性がある

➡ ヒットレート, 印加電圧値, 運転時間の依存性を調査する

■ 寿命改善型



概要

導入

- Belle II 実験
- TOPカウンター
- 光検出器 MCP-PMT

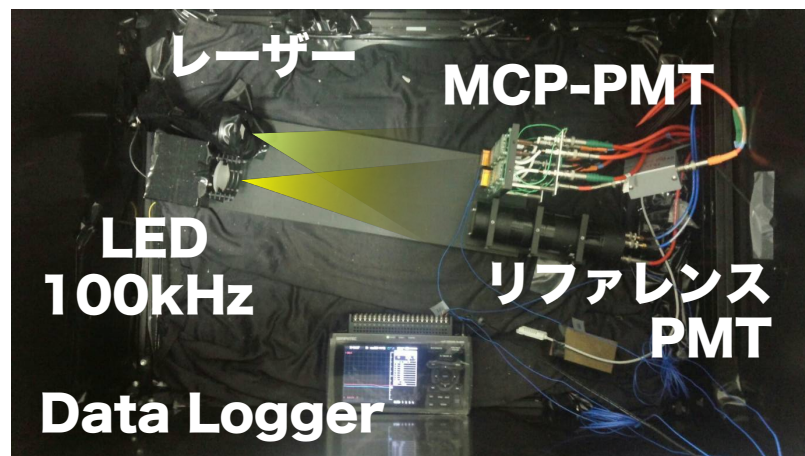
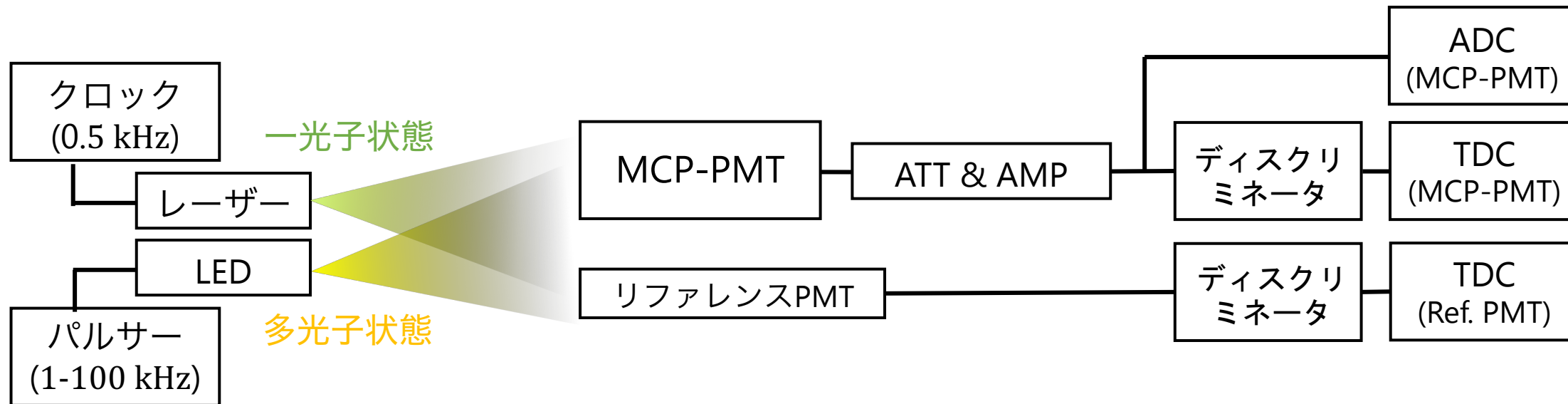
実験

- 研究目的
- 増幅率の温度依存性測定 (テストベンチ)
- 電圧印加直後の増幅率測定 (テストベンチ)
- 高ヒットレート時の増幅率測定 (テストベンチ)

結論

- 今後の展望
- まとめ

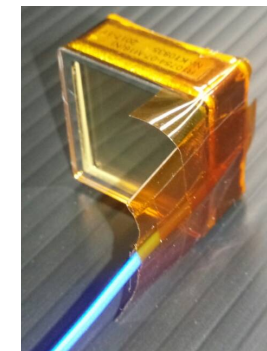
電圧印加直後の増幅率測定 (テストベンチ)



増幅率測定

- LEDが100 kHzのレートで多光子を照射する
- 高ヒットレートでの運転後、レーザーを各チャンネルに一光子状態の光量で照射し、出力電荷量の平均から増幅率を測定する (波長 $\lambda = 400 \text{ nm}$)

熱電対による温度測定

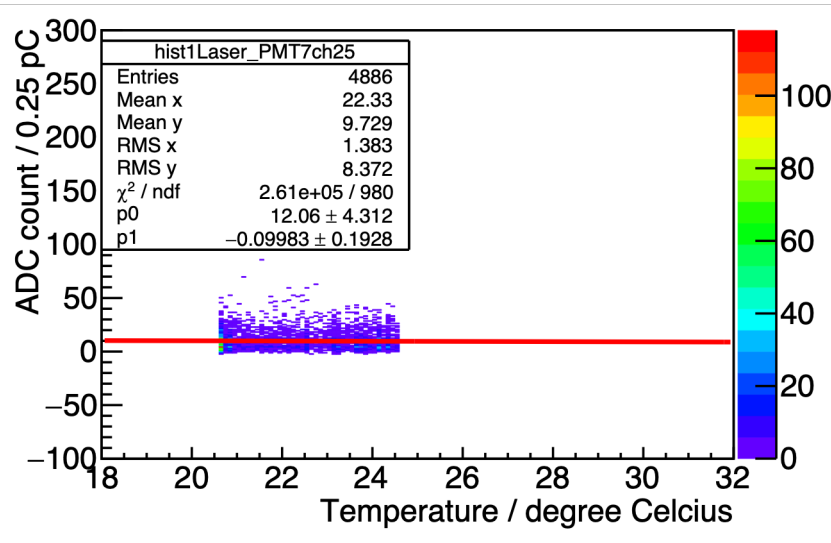


電圧印加直後の増幅率測定 結果

電圧印加直後には温度変化が生じている（非定常状態）

⇒ 電圧印加で生じる測定中の温度変化に依存した増幅率変動を見積もる

電圧印加直後の増幅率測定における温度依存性



増幅率の変化率

■ 初期量産型 $-0.00071 \pm 0.0604 / ^\circ\text{C}$

■ 寿命改善型 $-0.0024 \pm 0.0103 / ^\circ\text{C}$

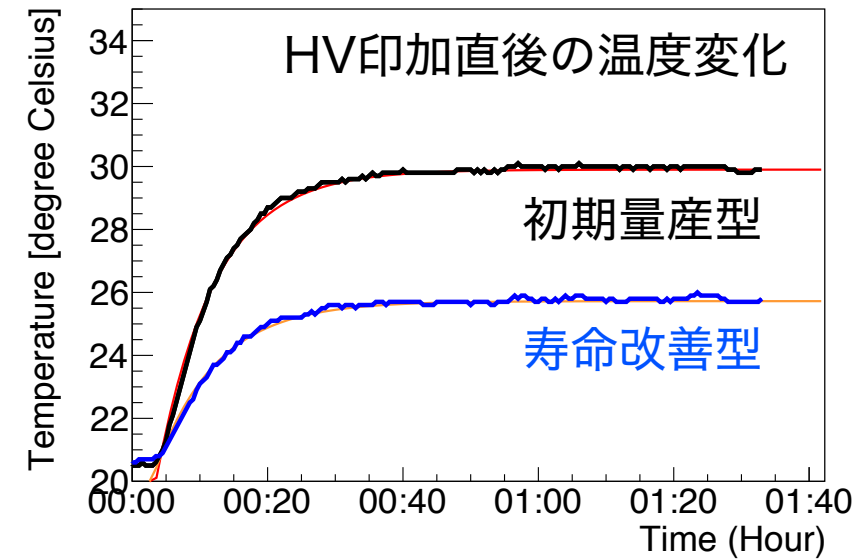
増幅率測定中に電圧印加直後の温度変化による増幅率の温度依存性は存在しない。

測定中はいずれも 10°C の変化に対して 1% 以下の増幅率変動誤差の範囲で最大で 6% 程度の増幅率変動と見積もられる

種類	長時間の100 kHz照射後に測定した増幅率との比
初期量産型	1.309 ± 0.009
寿命改善型	1.132 ± 0.005

一方で測定前の状況によって増幅率が変化
逐次的な測定が必要

➡ LED照射中のデータを用いた増幅率測定を行う



概要

導入

- Belle II 実験
- TOPカウンター
- 光検出器 MCP-PMT

実験

- 研究目的
- 増幅率の温度依存性測定 (テストベンチ)
- 電圧印加直後の増幅率測定 (テストベンチ)
- 高ヒットレート時の増幅率測定 (テストベンチ)

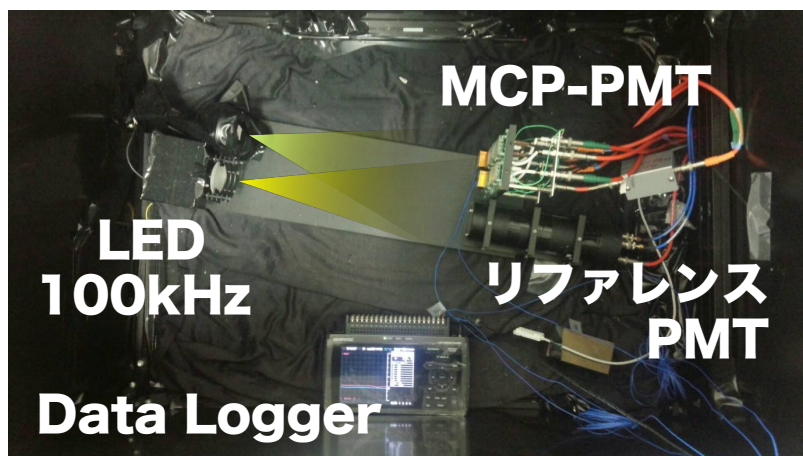
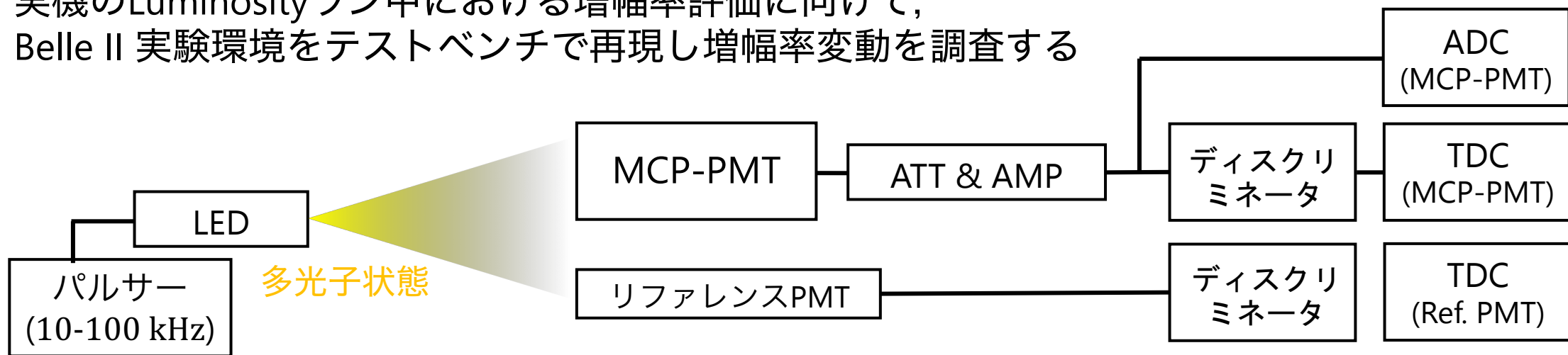
結論

- 今後の展望
- まとめ

高ヒットレート時の増幅率測定 セットアップ

ヒットレート, 印加電圧値, 運転時間の依存性を調査する

実機のLuminosityラン中における増幅率評価に向けて,
Belle II 実験環境をテストベンチで再現し増幅率変動を調査する



増幅率測定

- LEDが10 – 100 kHzのレートで多光子を照射する
(Belle II 実験環境における $\mathcal{O}(1) - \mathcal{O}(100)$ MHz/PMT に相当)
- 多光子状態のLED照射中に出力電荷量の平均から増幅率を測定する

高ヒットレート時の増幅率測定 結果

低レートにおける測定で増幅率が $1.0, 2.0, 4.0 \times 10^6$ となる電圧に設定
10 kHzと100 kHzの照射レートにおける増幅率を測定

増幅率 1.0×10^6 の
場合から推定される
ADCカウント

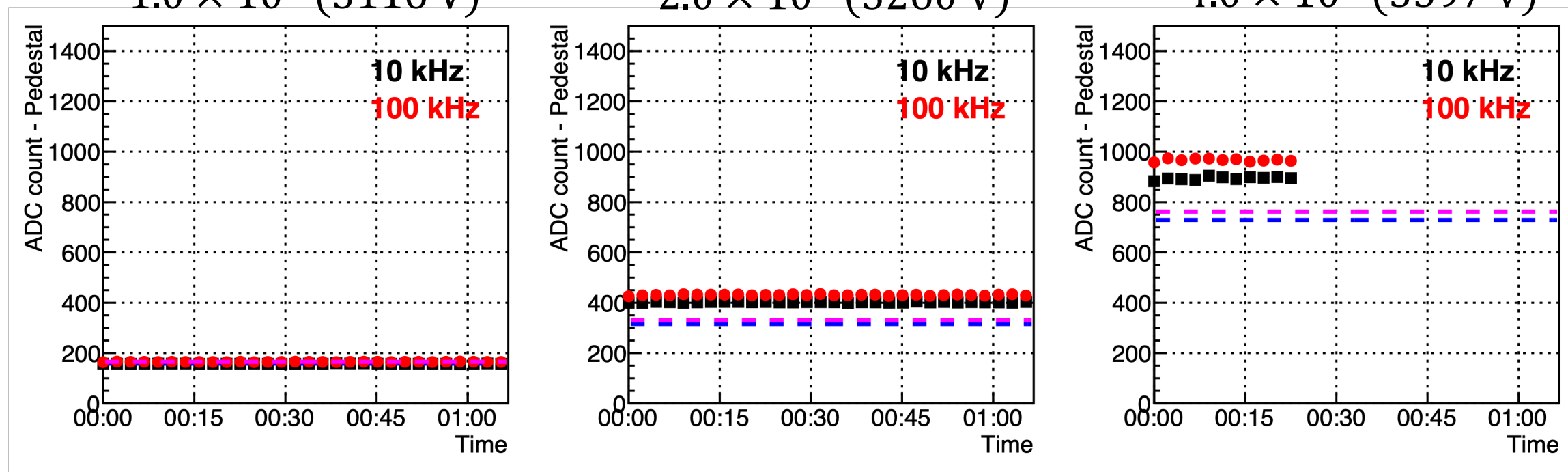
--- 10kHz
--- 100kHz

■ 初期量産型

1.0×10^6 (3116 V)

2.0×10^6 (3260 V)

4.0×10^6 (3397 V)



⇒ ヒットレートの増加, 印加電圧値の増加に伴って増幅率が増加

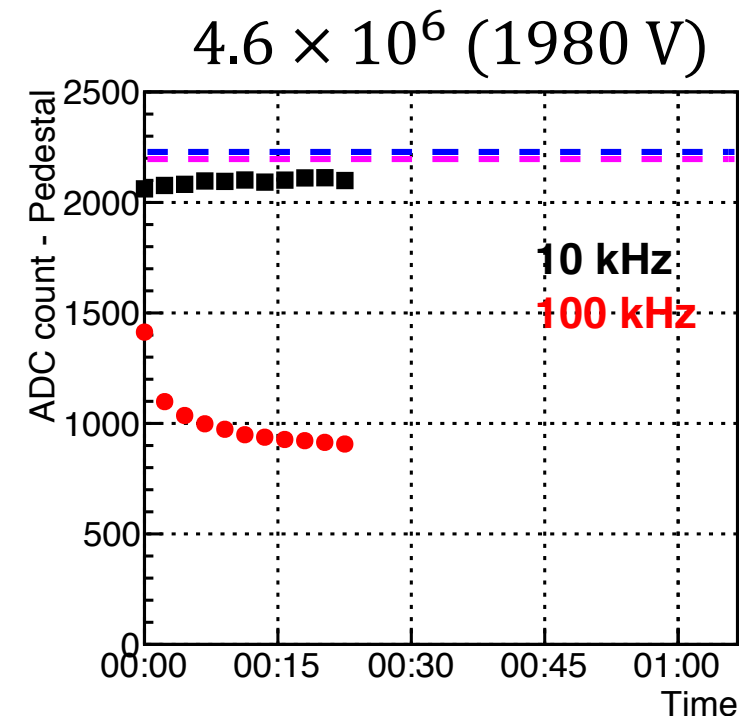
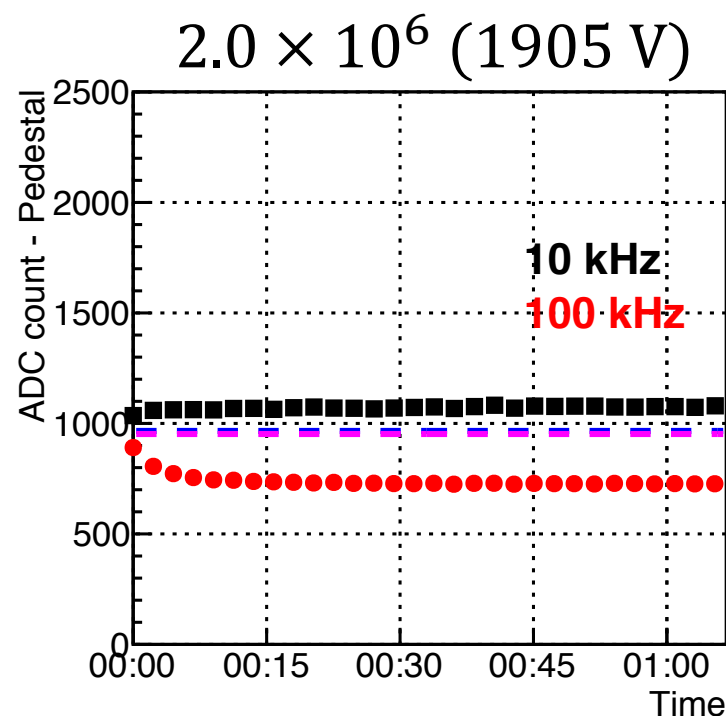
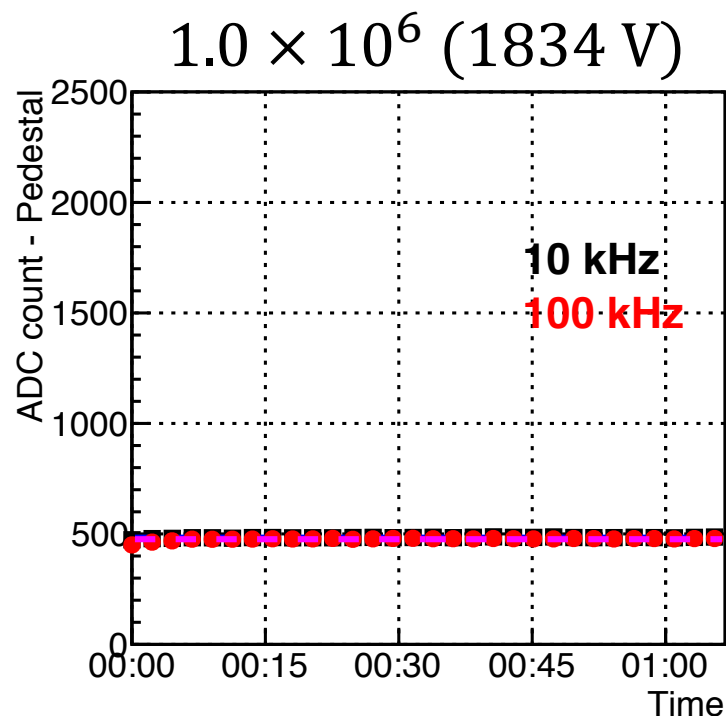
高ヒットレート時の増幅率測定 結果

低レートにおける測定で増幅率が $1.0, 2.0, 4.6 \times 10^6$ となる電圧に設定
10 kHzと100 kHzの照射レートにおける増幅率を測定

増幅率 1.0×10^6 の
場合から推定される
ADCカウント

--- 10kHz
--- 100kHz

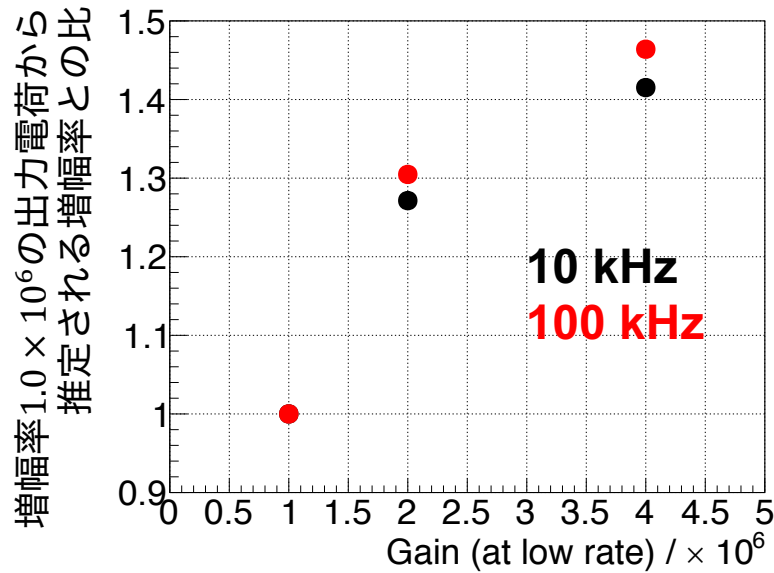
■ 寿命改善型



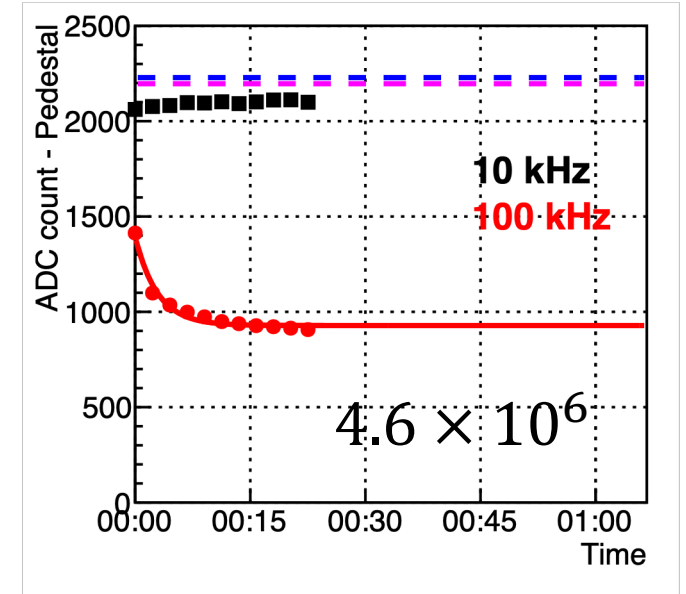
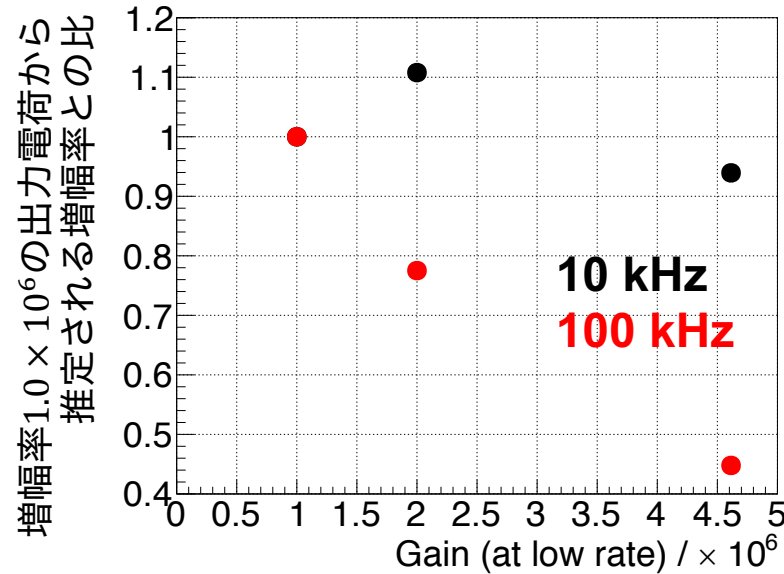
➡ 100 kHzで増幅率が時間経過とともに大幅な低下
10 kHzでは印加電圧値に依存して増減

ヒットレート, HVによる増幅率変動

■ 初期量産型



■ 寿命改善型



寿命改善型の100 kHzについては以下の式でフィッティングを行い

ADC($t \rightarrow \infty$) の値で評価

$$f(t) = (\text{ADC}(t \rightarrow \infty) - \text{ADC}(t = 0)) \left[1 - \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau}\right) \right] + \text{ADC}(t = 0)$$

MCP表面の電流値が大きい領域では印加電圧とヒットレートの増加に伴って増幅率も増加
MCP表面における電流値に対して増幅電子が多い実験環境で増幅率が低下

概要

導入

- Belle II 実験
- TOPカウンター
- 光検出器 MCP-PMT

実験

- 研究目的
- 増幅率の温度依存性測定 (テストベンチ)
- 電圧印加直後の増幅率測定 (テストベンチ)
- 高ヒットレート時の増幅率測定 (テストベンチ)

結論

- まとめ
- 今後の展望

まとめ

- SuperKEKB/Belle II 実験は2018年4月から初期衝突データを取得し、2019年3月より本格運転を開始する
- TOPカウンターの光検出器は増幅率変動により時間分解能や信号弁別効率の低下、あるいは寿命の低下につながるためその変動を評価しながら運用する必要がある
- 増幅率変動に関して次の3つの実験を行なった
 - レーザーを用いた増幅率測定（テストベンチ／実機）
 - 増幅率の温度依存性測定
 - 高ヒットレート時の増幅率測定
- これらの実験から以下のことが判明した
 - 初期量産型には増幅率の温度依存性がある
 - 電圧印加による測定中の温度変化は増幅率測定に影響しない
 - 増幅率は印加電圧とヒットレートに対する依存性が存在し、MCP表面の電流が原因であると考えられる

今後の展望

実機における増幅率変動の評価を目指す

➤ 温度依存性から

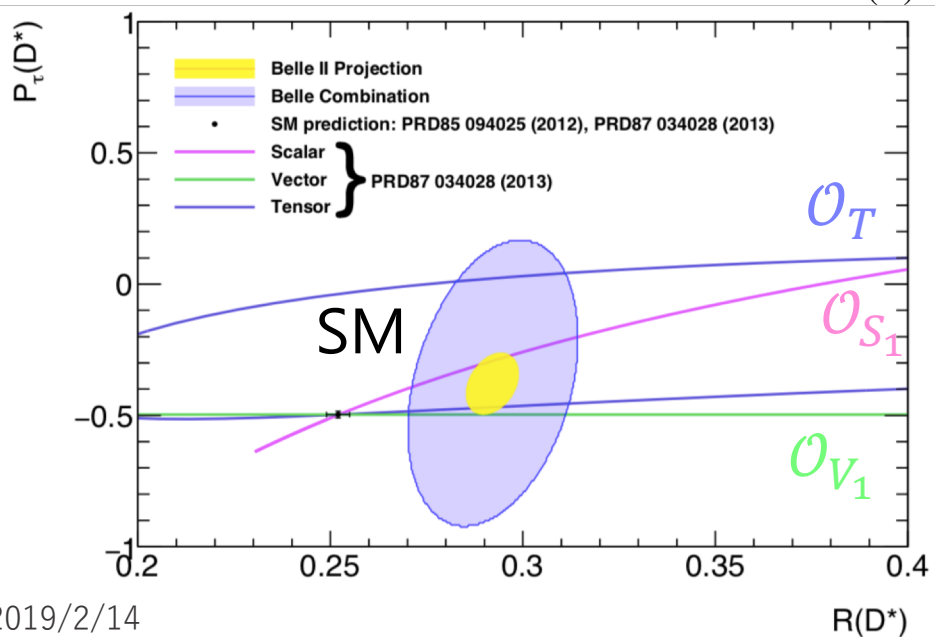
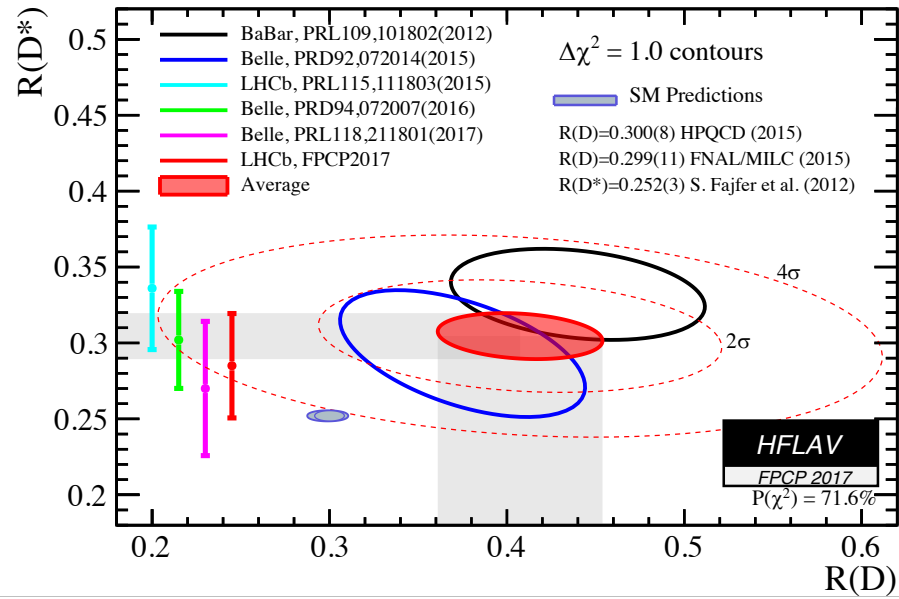
- 初期量産型については実験環境の温度との相関の確認
⇒ 初期量産型の増幅率変動の評価

➤ ヒットレート，印加電圧値，運転時間に対する依存性から

- 三者に対する増幅率変動の大きさの依存性を**テストベンチで見積もる**
- Belle II 実験 **Luminosityラン**における**検出光子のデータを用いた実機増幅率変動の大きさ算出の確立**
⇒ テストベンチとの比較による実機の増幅率変動の評価

Appendix

SuperKEKB / Belle II 実験



ALDコーティング

室山 玄太

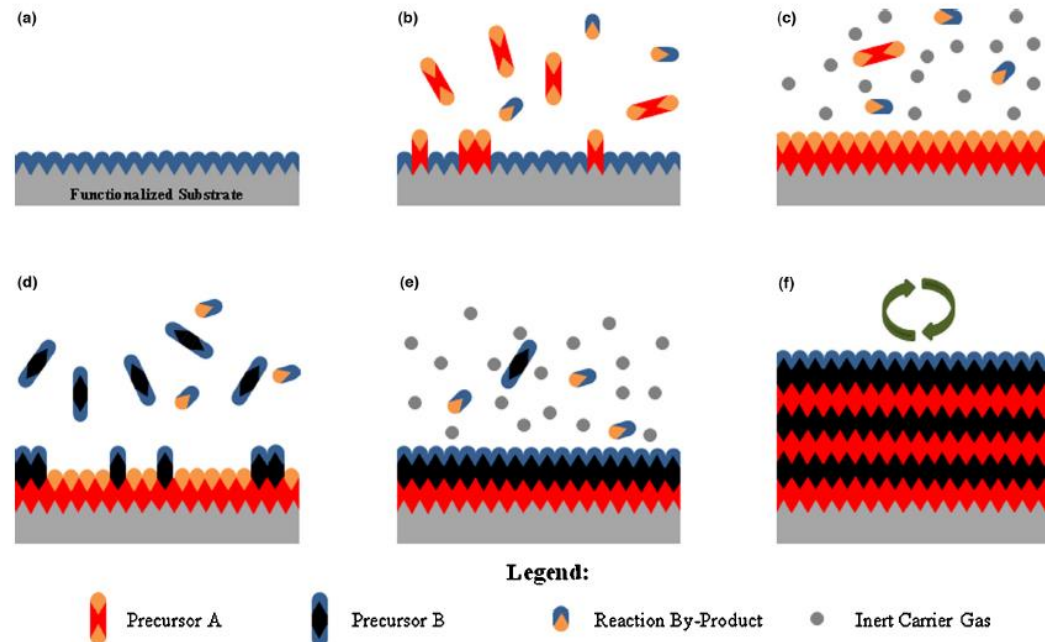
「角型MCP-PMTの光電面寿命に
対するフィードバックイオンの影
響」

(日本物理学会 2018年秋季大会)

ALDコーティング

Atomic Layer Deposition : 原子層堆積

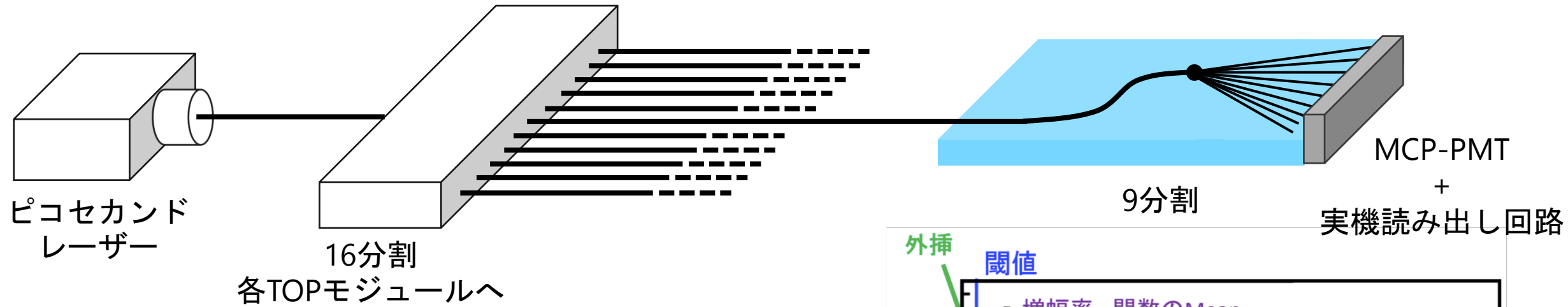
- 基板の上に原子を1層ずつ制御しながら成膜する
- 酸化物を前駆体Aにした場合、前駆体Bは水がよく使われる



日本物理学会 2018年秋季大会

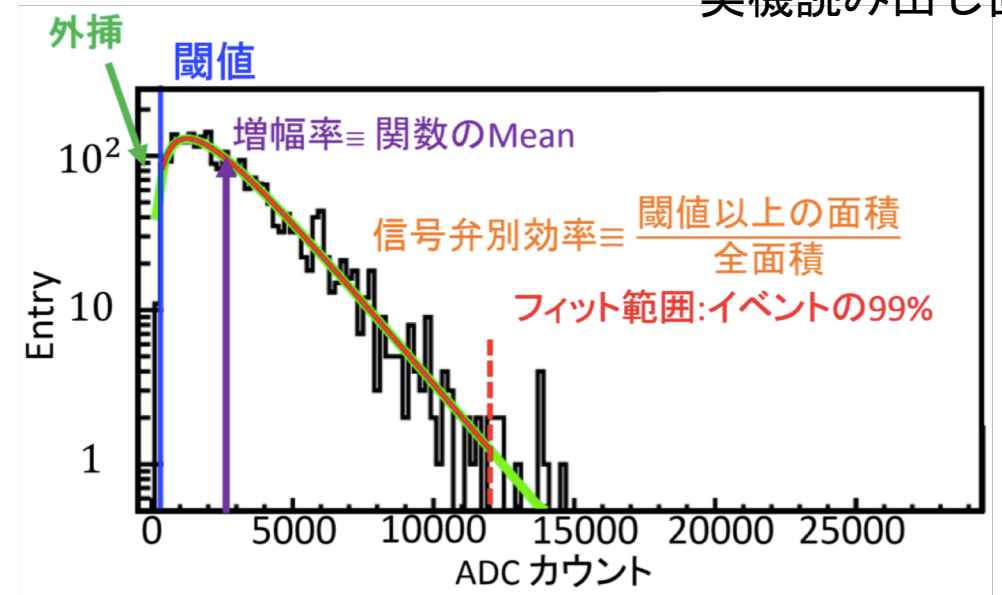
Richard W. Johnson, et al., *Mater.Today* 17 (2014) 236 2018/9/15

レーザーを用いた増幅率測定 (テストベンチ)



増幅率測定

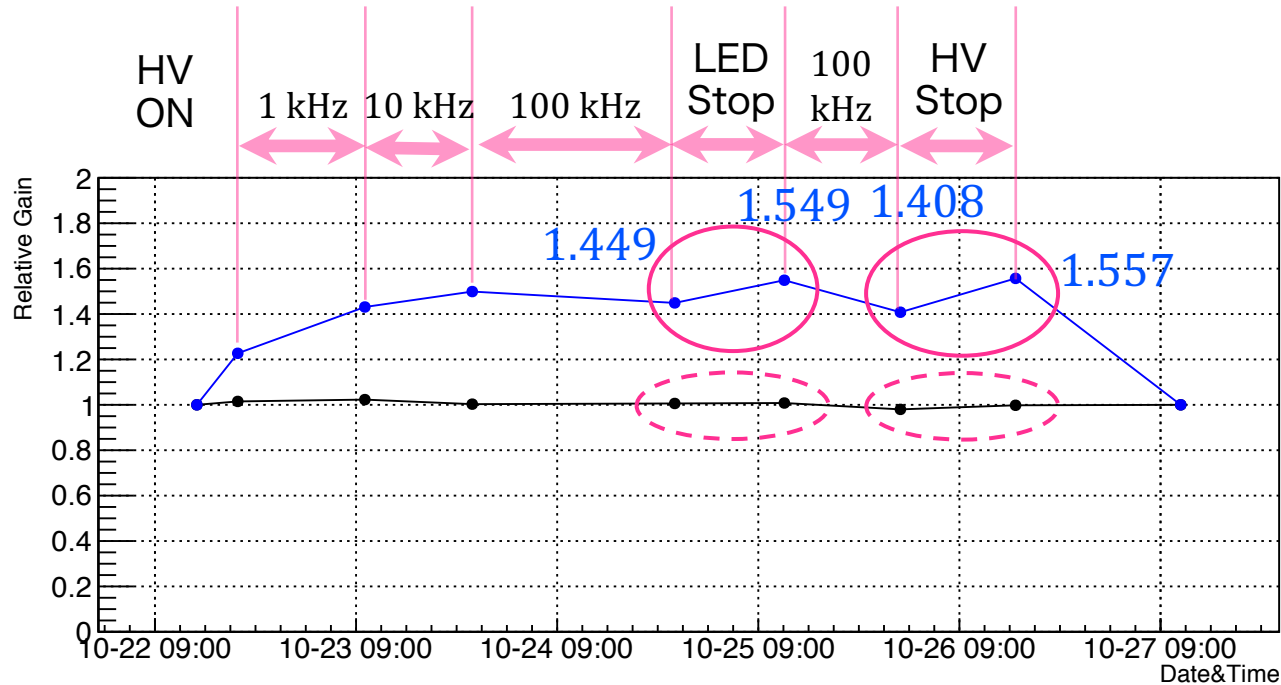
- レーザーを各チャンネルに1光子状態の光量で照射
- 発行タイミングに同期したテストパルスを入力してレーザーデータを抽出
- フィット関数を用いて関数が囲う面積の中央値から平均電荷量を求め、増幅率を算出する



$$f(x) = p_0 \left(\frac{x}{x_0} \right)^{p_1} \exp \left(- \left(\frac{x}{x_0} \right)^{p_2} \right)$$

レーザーを用いた増幅率測定 結果

■ テストベンチ (増幅率 2.0×10^6 の電圧)



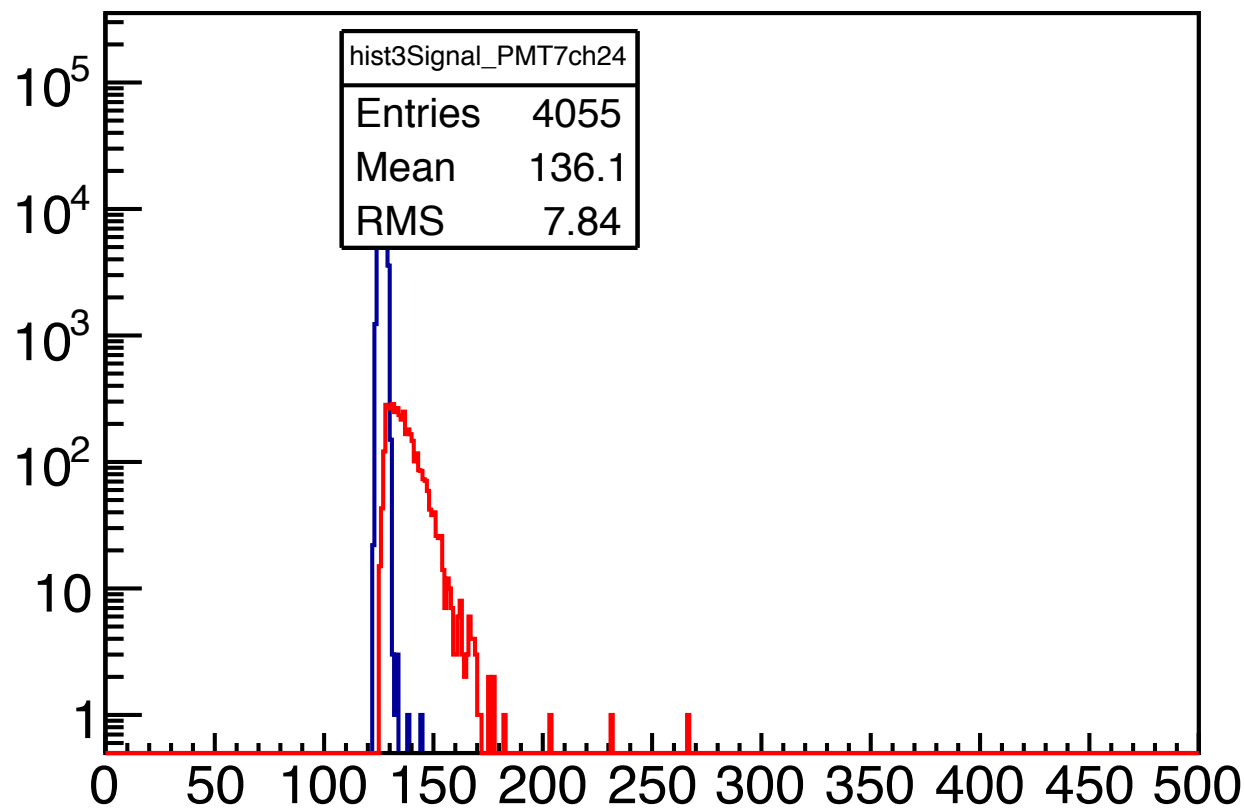
● 初期量産型 ● 寿命改善型

- 初期量産型に相対増幅率の変化は見られない
- 寿命改善ALD型では運転時間の増加に伴って相対増幅率が増加
- 100 kHzの運転後には相対増幅率が低下
- HVやLED休止後は相対増幅率が増加

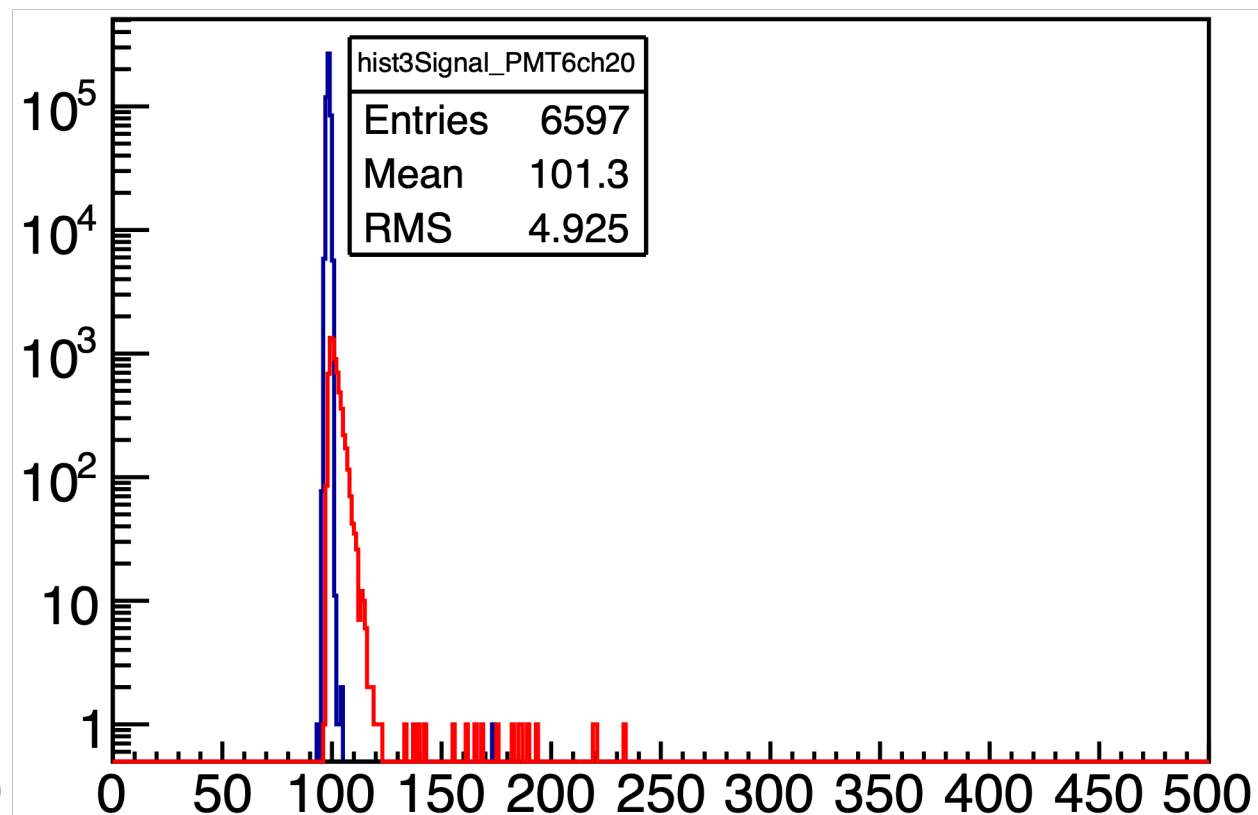
➡ MCPの温度に依存している可能性を示唆

レーザーを用いた増幅率測定 ADC分布

初期量産型



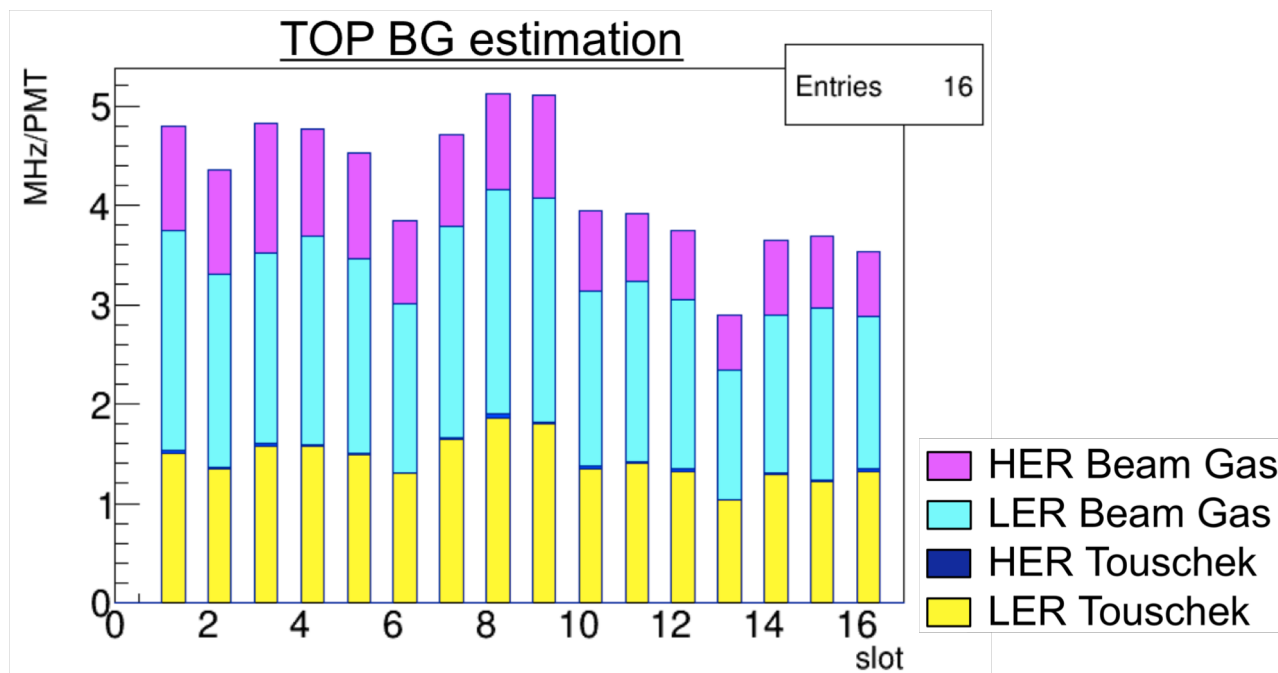
寿命改善型



高ヒットレート時の増幅率測定 ヒットレート

LEDが100 kHzのレートで多光子を照射する
(Belle II 実験環境における高ヒットレートの再現)

設計値のルミノシティにおける
Backgroundレートの推定値



LED1回の照射あたりの光子数

初期量産型 56.9

寿命改善型 109

増幅率 1.0×10^6 設計値

初期量産型 17.7

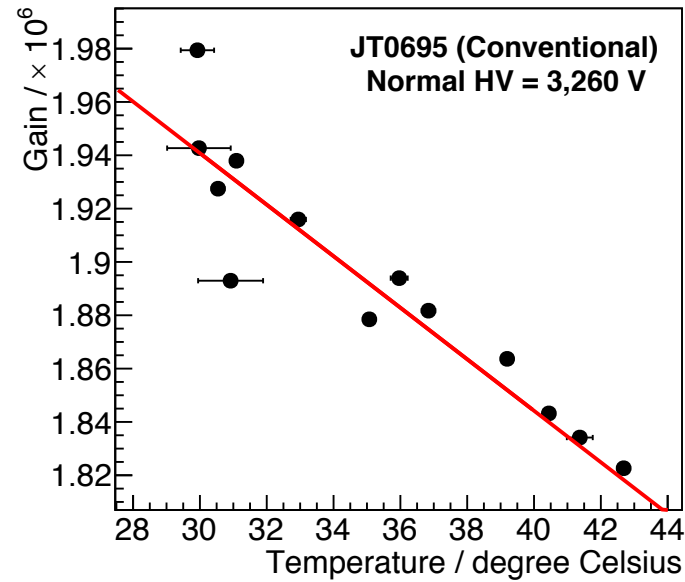
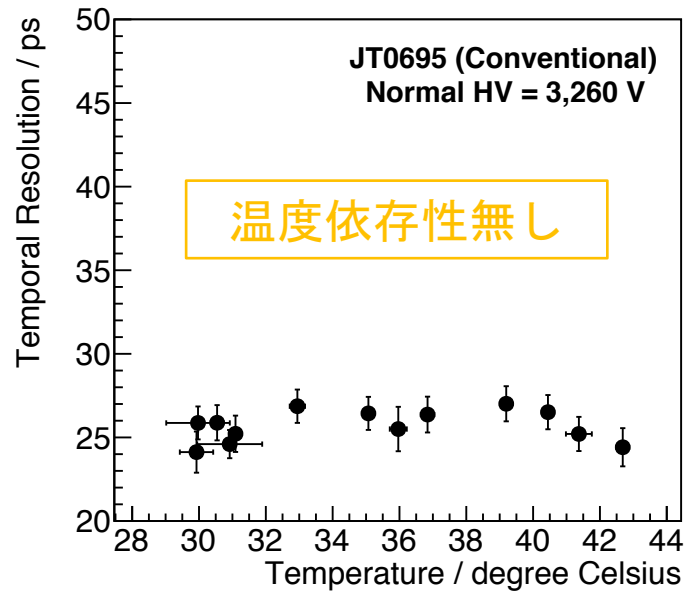
寿命改善型 60.2

“TOP BACKGROUND STUDY”

by N. Tsuzuki (Nagoya University)

温度依存性測定 結果

初期量産型



寿命改善ALD型

