

TOPカウンターの光検出器増幅率と 信号弁別効率の評価

2017/10/30

名古屋大学 M1 奥藤 陸矢

Belle II 実験

2

- 世界最高強度の電子・陽電子衝突型実験
 - 標準模型の検証
 - 新物理探索
- $B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu$
 - 現在までの測定での世界平均と標準模型の予想とのずれが 4σ
 - Belle II の統計で新物理かどうかの確証を得られる
 - 終状態 (K 中間子、 π 中間子、 μ 粒子など) から D 中間子や τ 粒子を再構成 → **粒子識別が重要!**

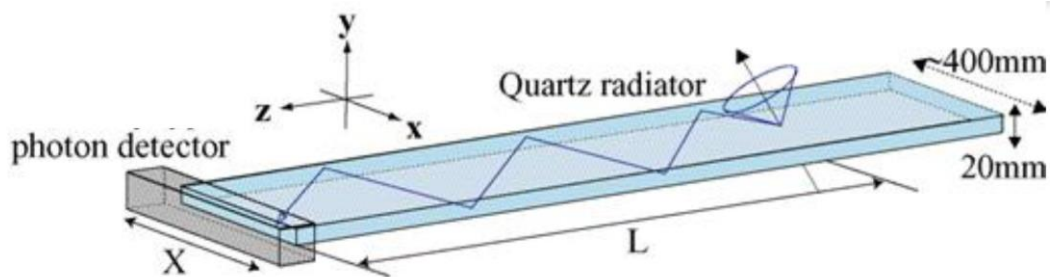
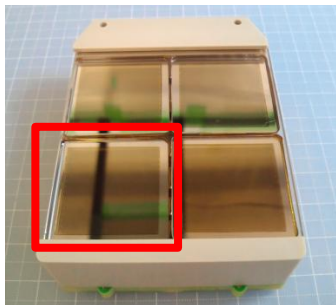
TOPカウンターと光検出器MCP-PMT

3

- Belle II 検出器の粒子識別装置の一種
 - ▣ 荷電粒子が石英輻射体内で出す微弱なチェレンコフ光を測定
 - ▣ 1光子測定で50ps以下の時間分解能
- 光検出器MCP-PMTを浜松ホトニクスと共同開発

MCP-PMT(4台で1モジュール)

TOPカウンター



現在、(TOPカウンター 16台)×(MCP-PMT 32個) = 512個が Belle II 検出器にインストールされている。

MCP-PMTの増幅率

4

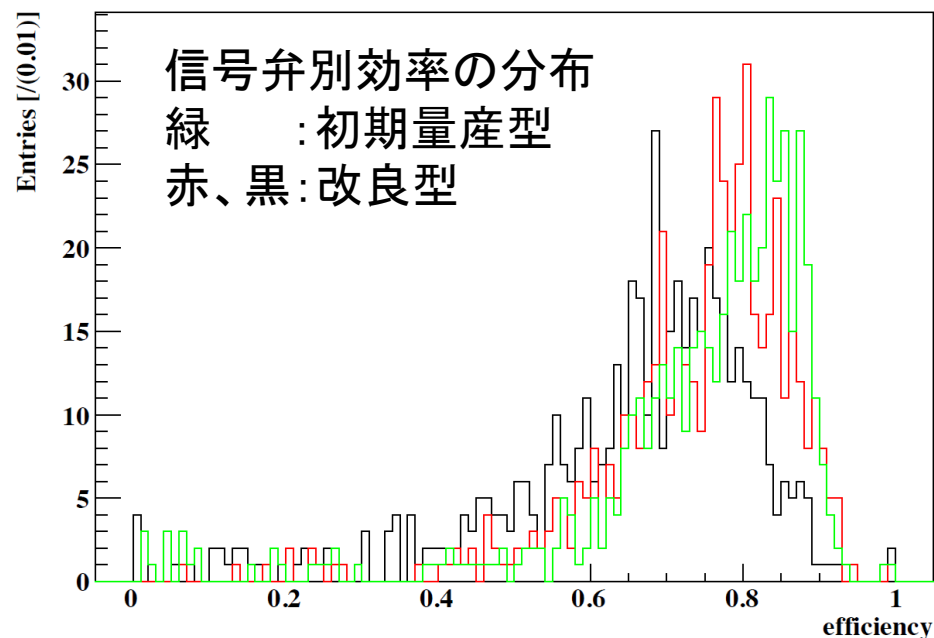
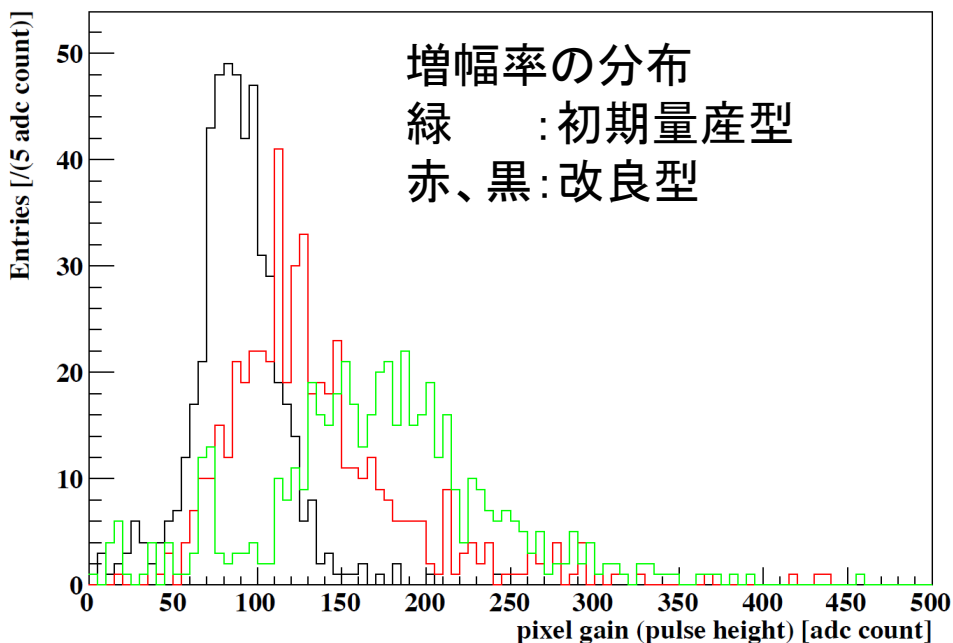
- 量産されたMCP-PMTは名古屋大学のテストベンチで性能評価
 - 時間分解能
 - 量子効率
 - 増幅率-印加電圧の関係 etc.
- インストールされたMCP-PMTの増幅率は名古屋の測定に基づいて 0.5×10^6 に設定
 - 高い増幅率での光電面劣化を抑える
 - 検出効率は十分に出る
- しかし、名古屋のテストベンチと実機における電圧分割器の違いにより、増幅率が異なってしまう

増幅率のばらつき

5

- 増幅率や信号弁別効率が各MCP-PMTでばらついて
いる

名古屋大学 前田陽祐さんのスライドより



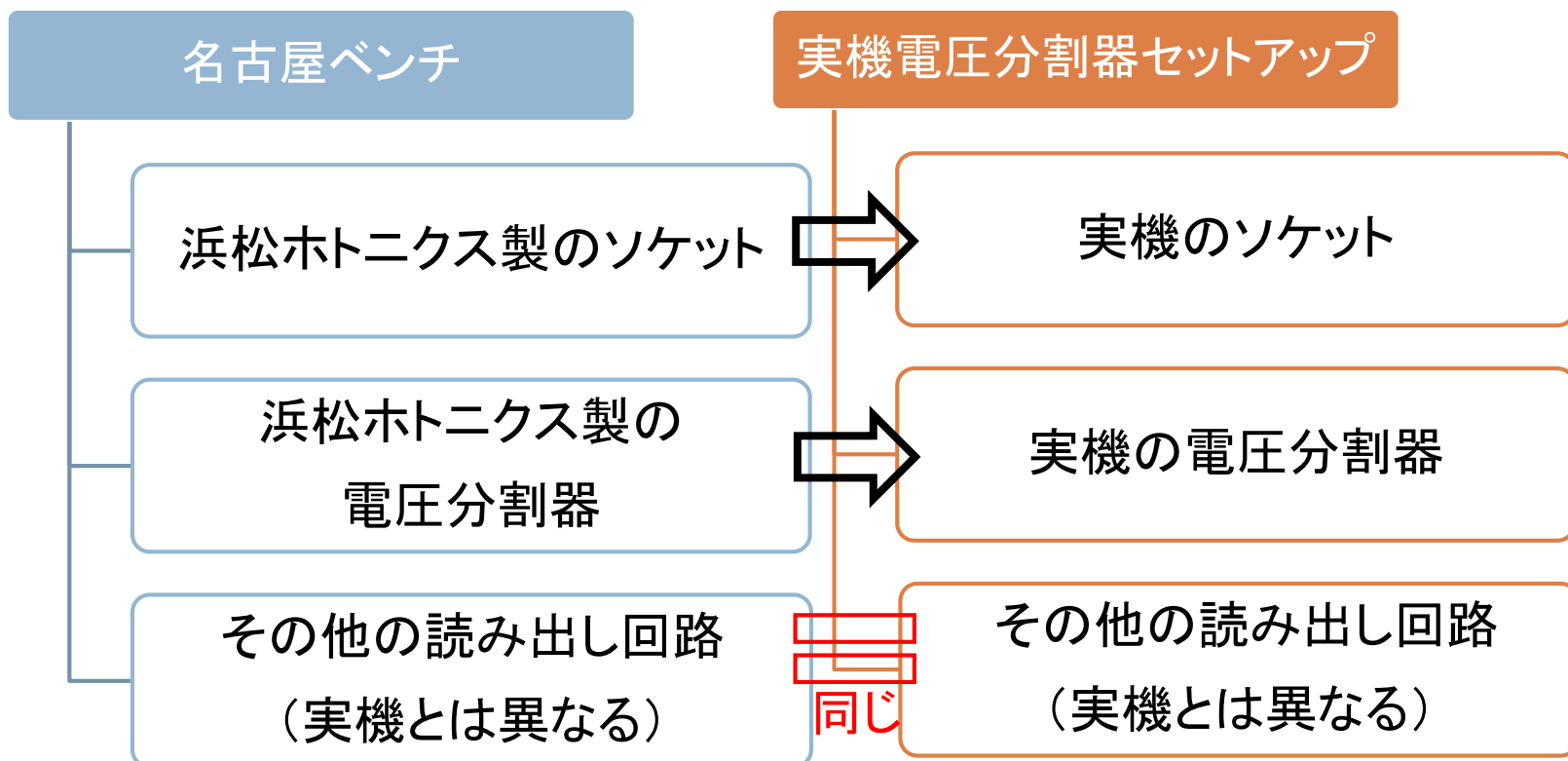
- 改良型では比較的低い増幅率・信号弁別効率
- 信号弁別効率が十分でない個体が多数ある

電圧分割器の比較

6

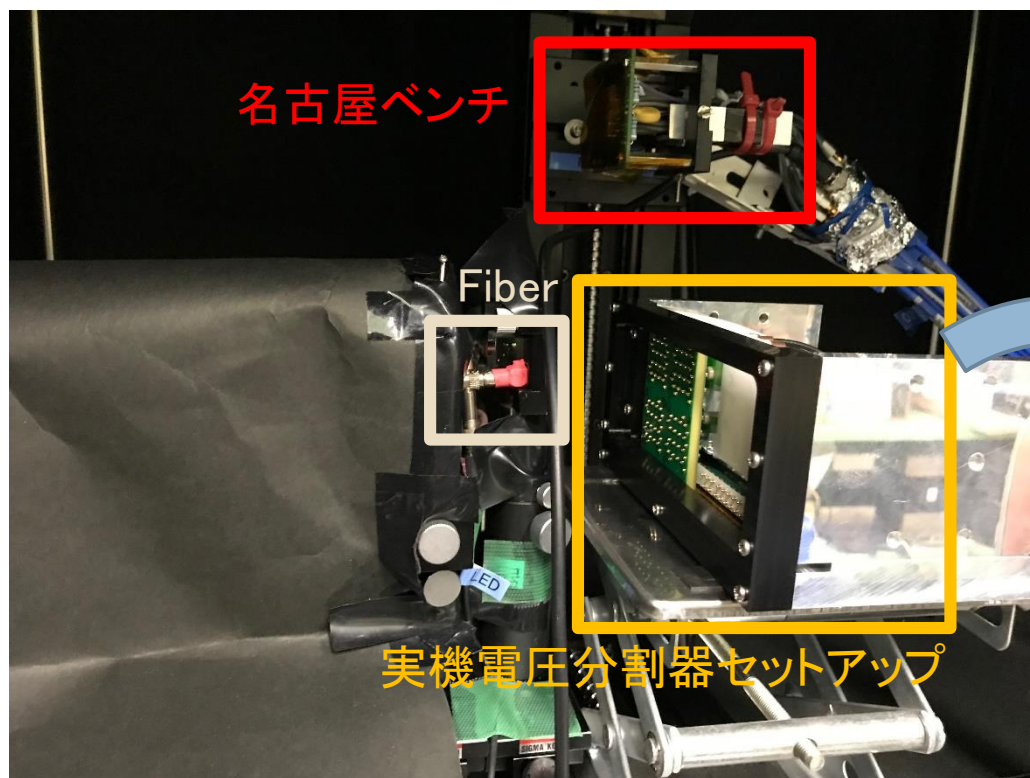
- 名古屋ベンチを改良し、**同じ読み出し回路**で実機の電圧分割器を使ったセットアップを構築

→ **電圧分割器の違いによる増幅率の違いを定量的に評価**

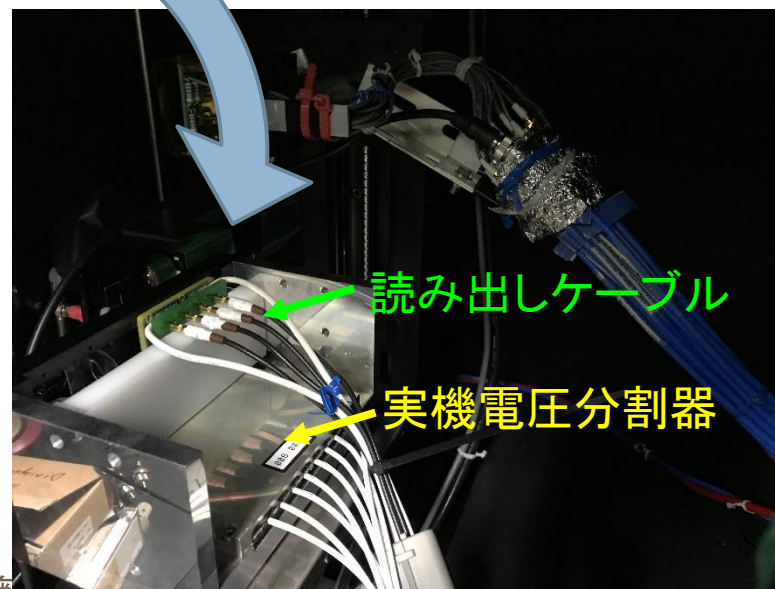


実機電圧分割器セットアップ

7



暗箱中で1光子測定

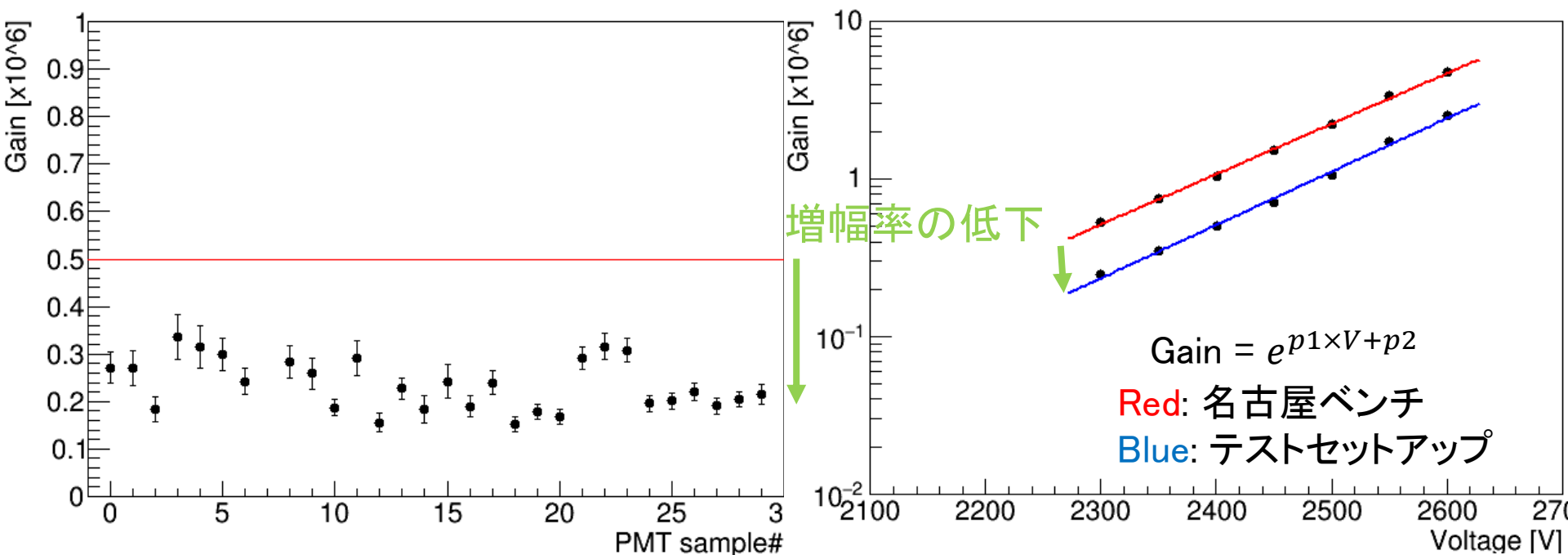


実機用ソケット・電圧分割器と名古屋ベンチの読み出し回路を統合するために治具を作成

電圧分割器による増幅率の違い

8

- 名古屋ベンチとテストセットアップで同じMCP-PMTを測定して比較
 - 名古屋ベンチでの増幅率: 0.5×10^6
 - 実機電圧分割器セットアップでの増幅率: 左下のプロット

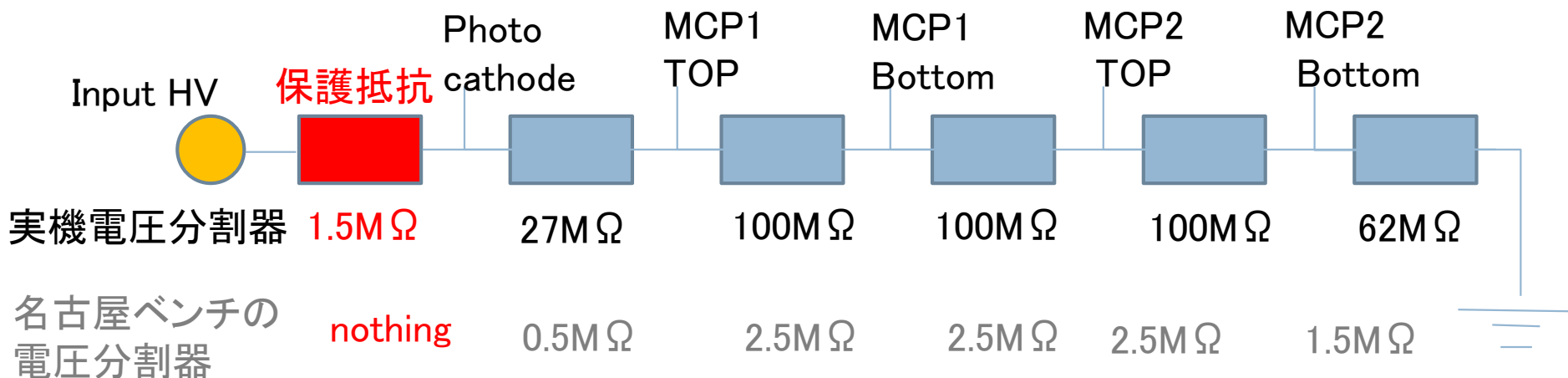


増幅率低下の原因

9

- 実機の電圧分割器
 - 保護抵抗が印加電圧に影響

$$\frac{(\text{sum of the all resistances}) - (\text{protect resistance})}{(\text{sum of the all resistances})} \sim 96\% \rightarrow 4\% \text{減}$$



実機電圧分割器への補正

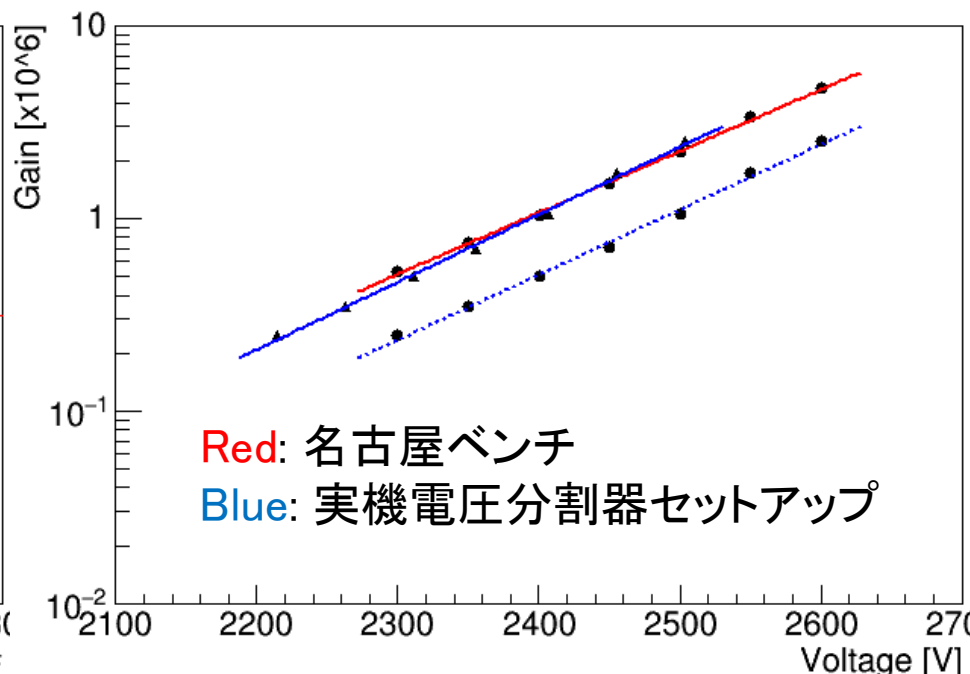
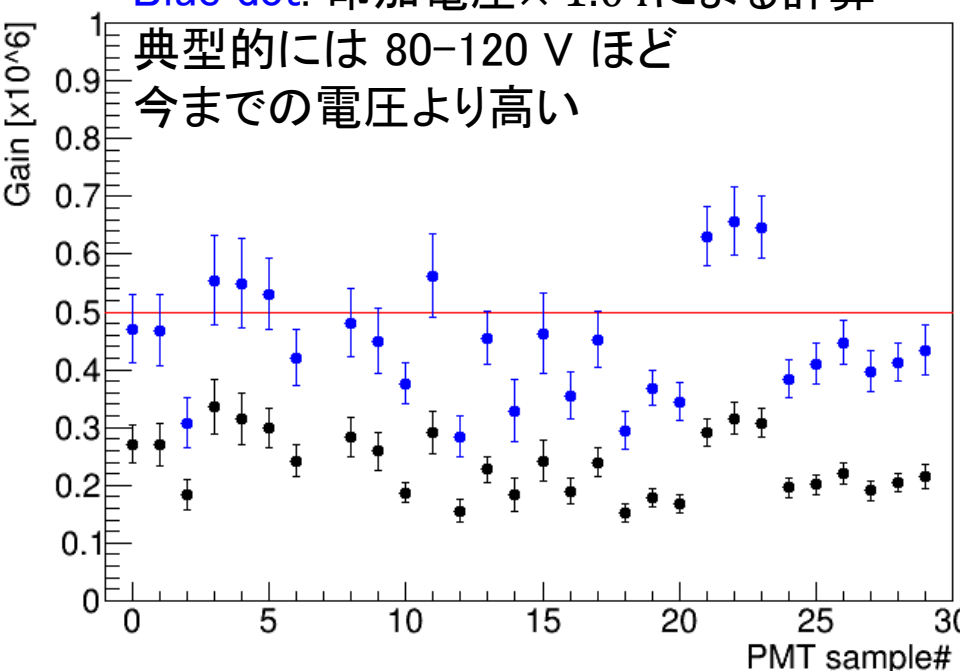
10

- 実機電圧分割器でのデータに“印加電圧 × 1.04”の補正をかけた

Black dot: 印加電圧による計算

Blue dot: 印加電圧 × 1.04による計算

典型的には 80-120 V ほど
今までの電圧より高い

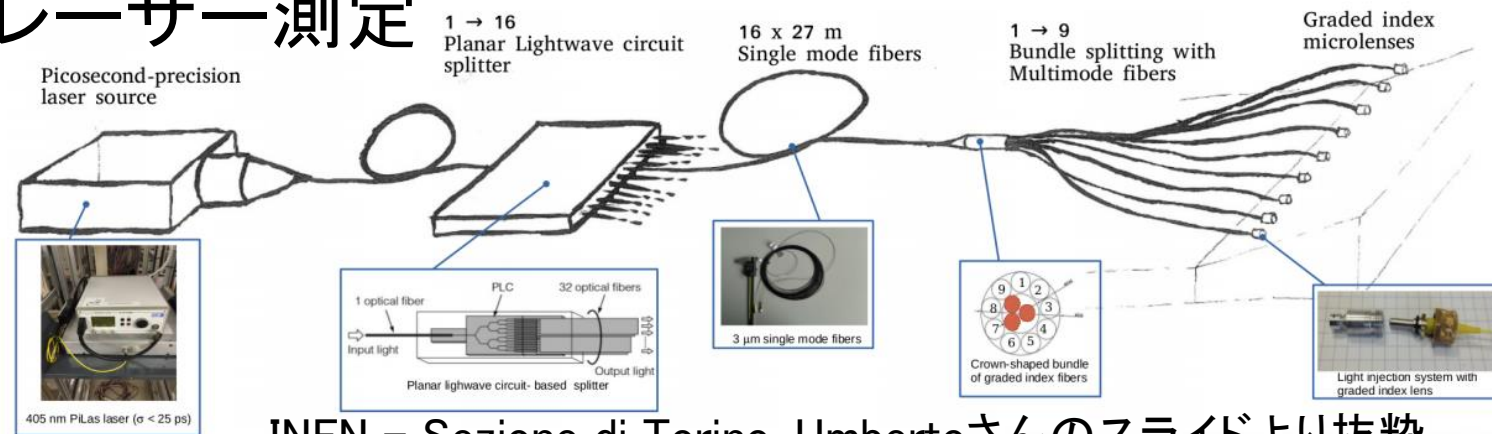


- 増幅率-印加電圧曲線が一致
- この電圧で 0.5×10^6 付近に設定できることが分かった

TOPカウンターのレーザー測定

11

□ レーザー測定



INFN - Sezione di Torino, Umbertoさんのスライドより抜粋

□ 増幅率・効率の評価を二つの方法で行う

□ 効率: 検出されたヒットの数

- 収集効率・量子効率も含むため、相対値のみが得られる

□ 増幅率: ADCのmean値

- 閾値以下のデータが存在しないため、過大評価してしまう

□ フィッティングによる見積もり

フィッティングによる見積もり方法

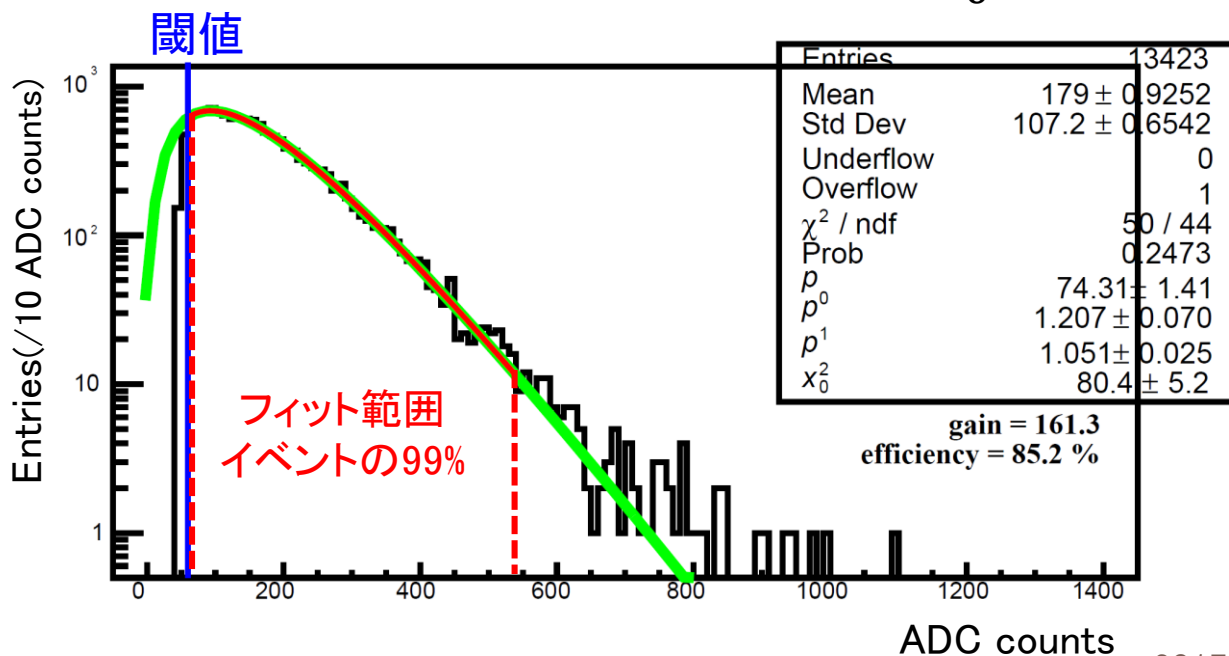
12

フィッティング関数: 経験に基づくもの

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

$$\text{増幅率} = \frac{\int x f(x) dx}{\int f(x) dx}$$

$$\text{効率} = \frac{\int_{\text{threshold}}^{\infty} f(x) dx}{\int_0^{\infty} f(x) dx}$$



増幅率/効率と電圧の関係

13

今まで増幅率が 0.5×10^6 になると思っていた初期設定電圧から値を変化させてデータを取得

● フィッティングによる増幅率・効率

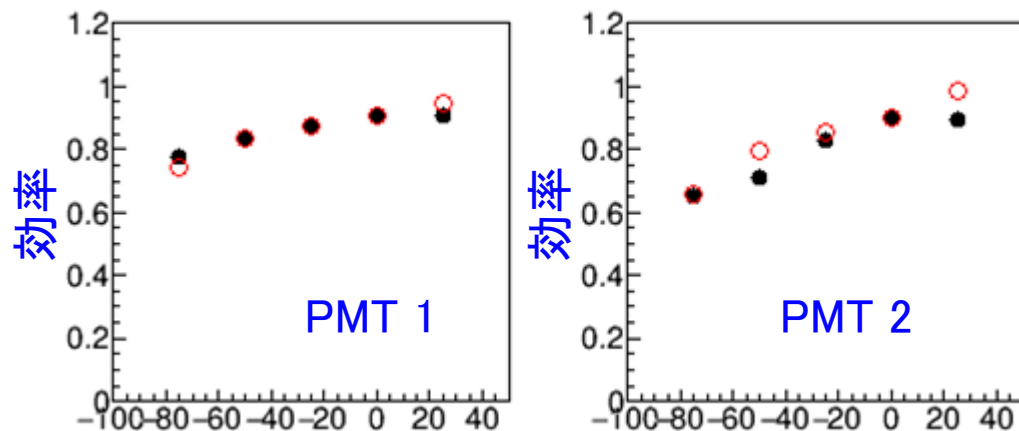
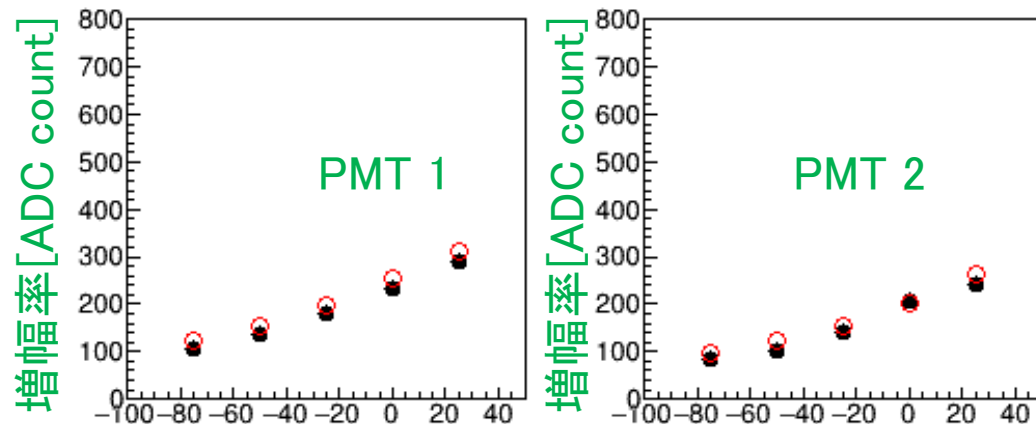
($\frac{\chi^2}{ndf} > 10$ のデータを省いている)

○ mean値・ヒット数からの増幅率・効率
(効率は0Vで規格化)

□ フィッティングから求めた増幅率・効率が、mean値・ヒット数から求めたものと概ね一致

□ mean値が大きく出ているのは閾値以下の分布を考慮できていないため

効率は一致しない点がある
→ **フィッティングを改善**する必要がある



初期設定電圧から変化させた値 [V]

まとめと今後

14

- 実機と名古屋それぞれの電圧分割器を直接的に比較した

→実機では4%高い電圧をかけることで、増幅率を目標の 0.5×10^6 付近に設定できる

- 実機のデータでは、フィッティングとmean値・ヒット数から得た増幅率・効率は概ね一致

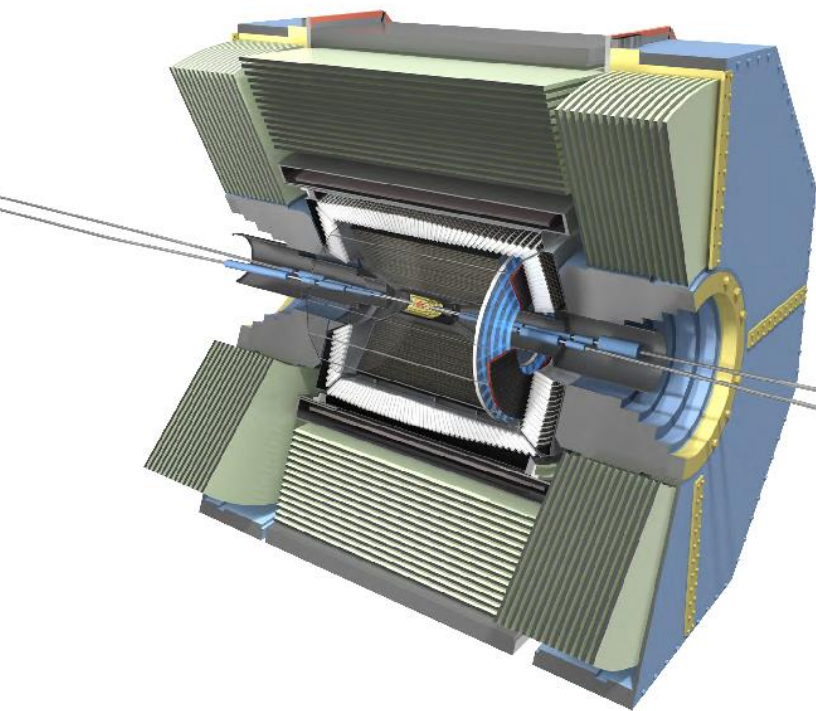
今後

- 実機で印加電圧を最終決定
 - ▣ 増幅率/効率-電圧曲線
 - ▣ フィッティングの質の向上

Back Up

Belle検出器

16

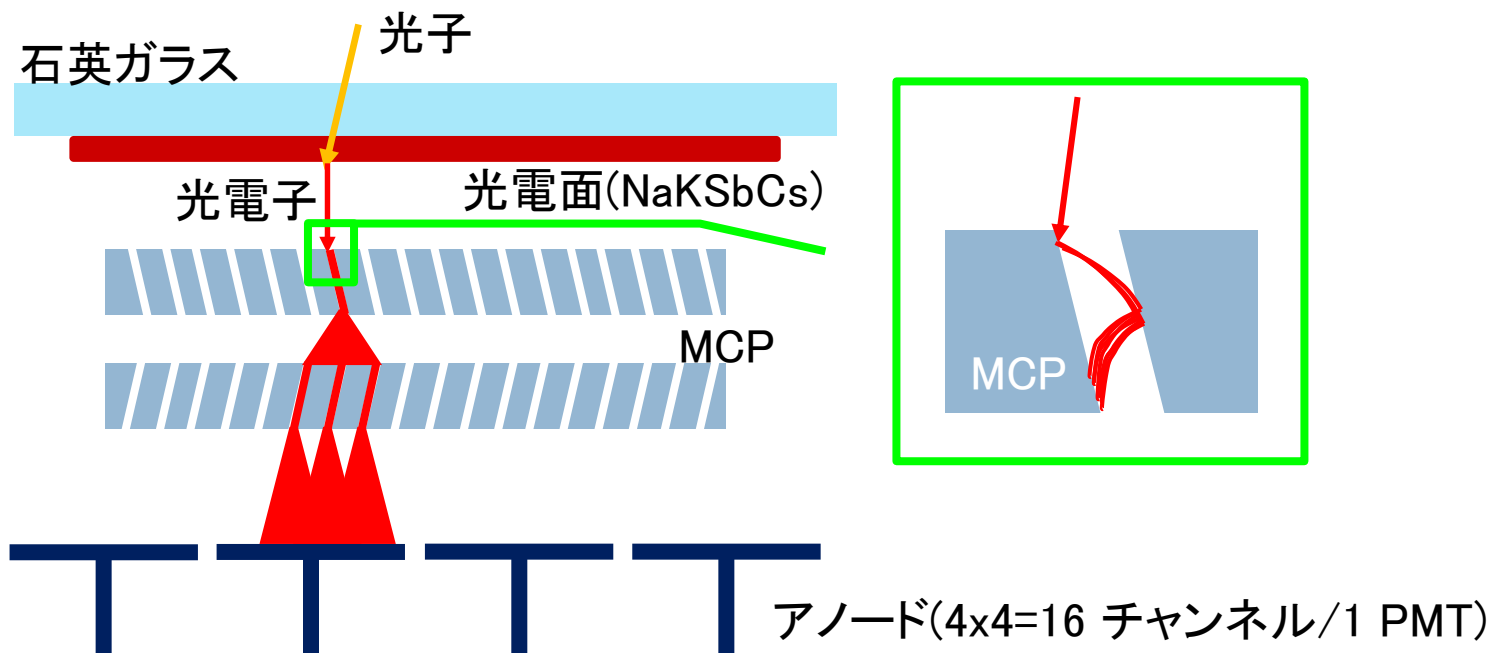


- Super KEKBの衝突点周りにある検出器
- TOPカウンターは16台が円筒のバレル部分にインストールされており、荷電粒子識別をする。
- 円筒のエンドキャップ部分はエアロジェルRICH検出器が荷電粒子識別を行っている。

MCP-PMT

17

- MCP: 鉛ガラスを水素還元
 - 初期量産型
 - ALD・・・MCPをAtomic Layer Deposition コーティング
 - 寿命改善型ALD・・・ALD+残留ガス対策強化



Efficiency–HV relation (0T, slot14)

18

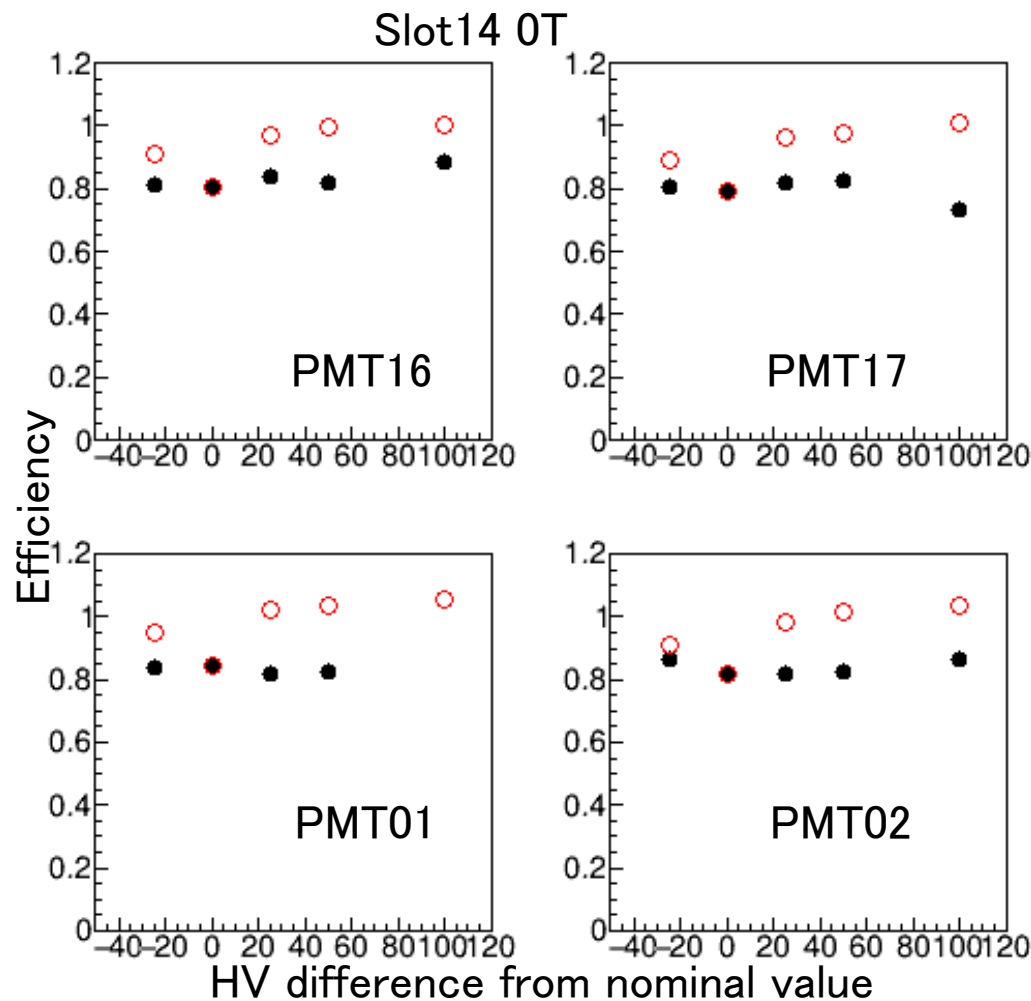
In slot14, all PMT is conventional

● efficiency deduced by the fitting

omitted $\frac{\chi^2}{ndf} > 10$

○ efficiency estimated from the hit rate (normalized at 0V)

□ 0V red circle drops



Efficiency–HV relation (1.5T, slot14)

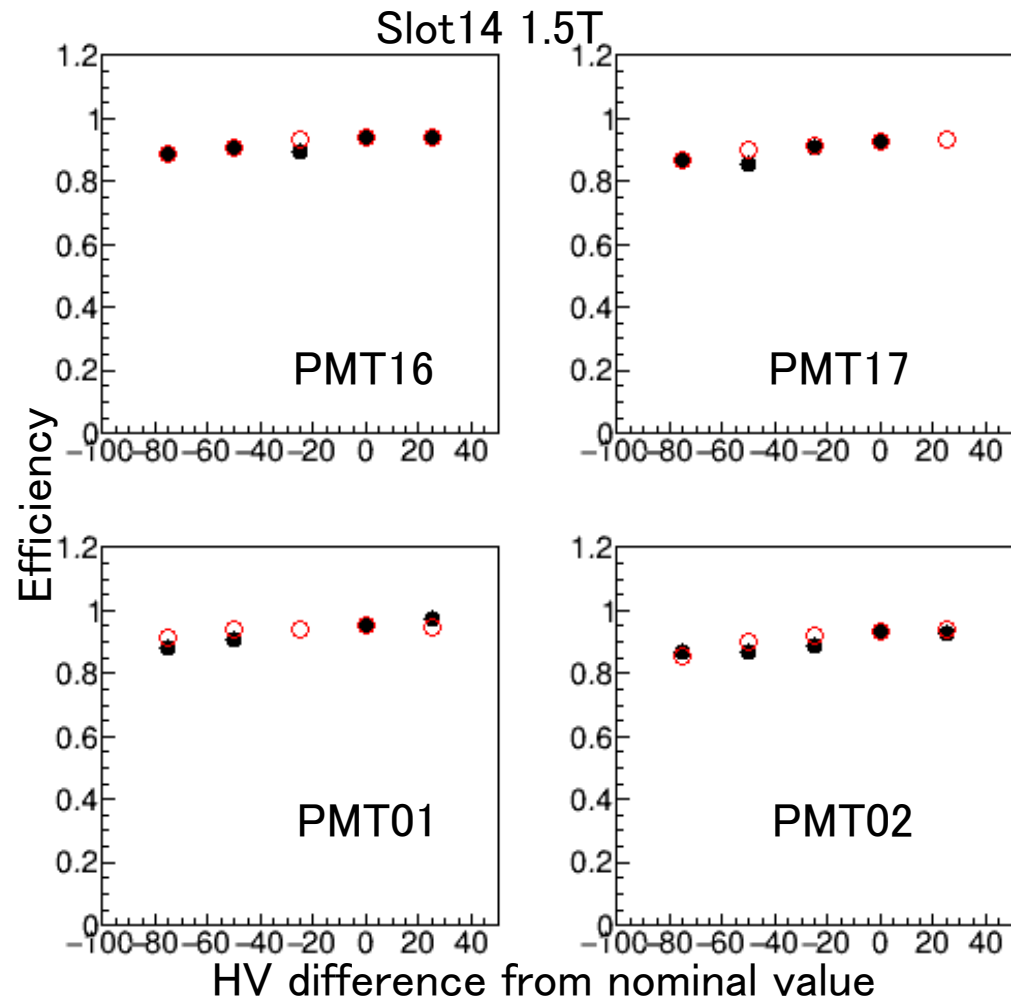
19

In slot14, all PMT is conventional

● efficiency deduced by the fitting
omitted $\frac{\chi^2}{ndf} > 10$

○ efficiency estimated from the hit rate (normalized at 0V)

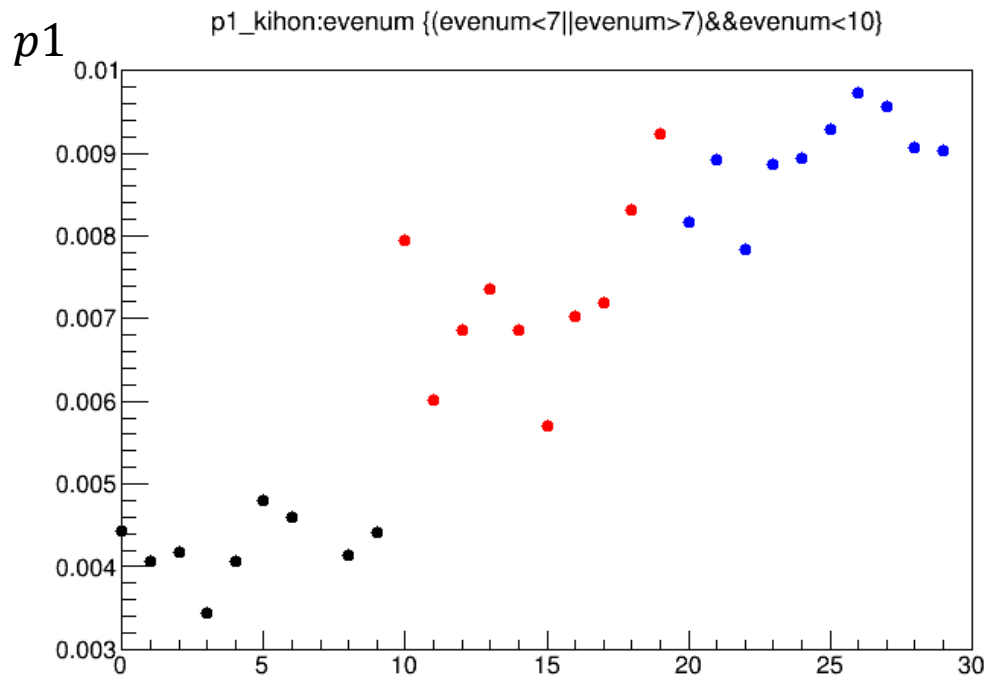
- There are plateau?
- Results from the two methods are consistent.



Fit parameter

20

- Slope is difference between PMT types



$$\text{Gain} = e^{p1 \times V + p2}$$

Black: conventional
Red: norm.ALD
Blue: Life-ex ALD

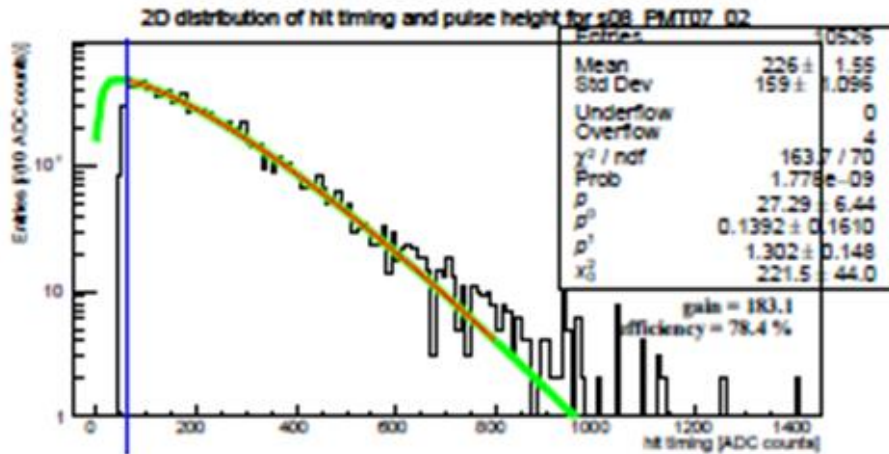
ADC分布のフィット

21

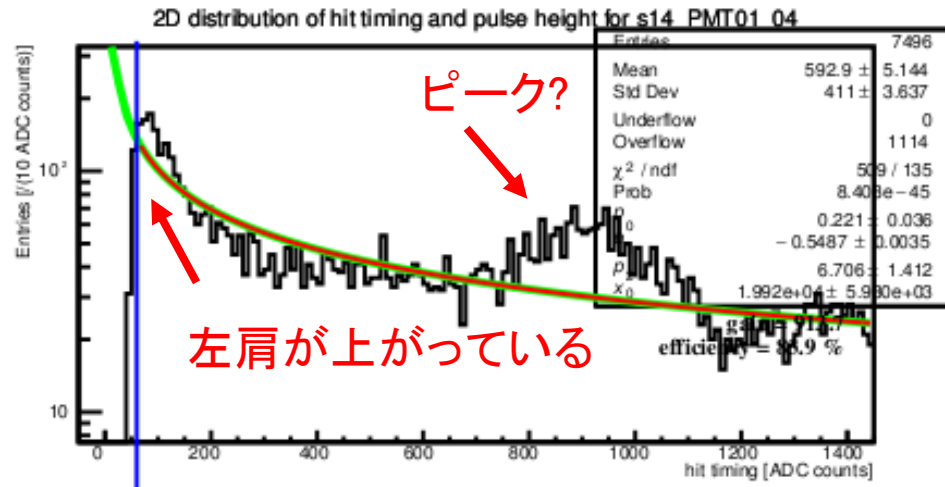
Fitting function

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

succeeded (slot8, PMT07, ch02, +100V)



failed (slot14, PMT01, ch04, +100V)



ADCの分布を改善しないといけない

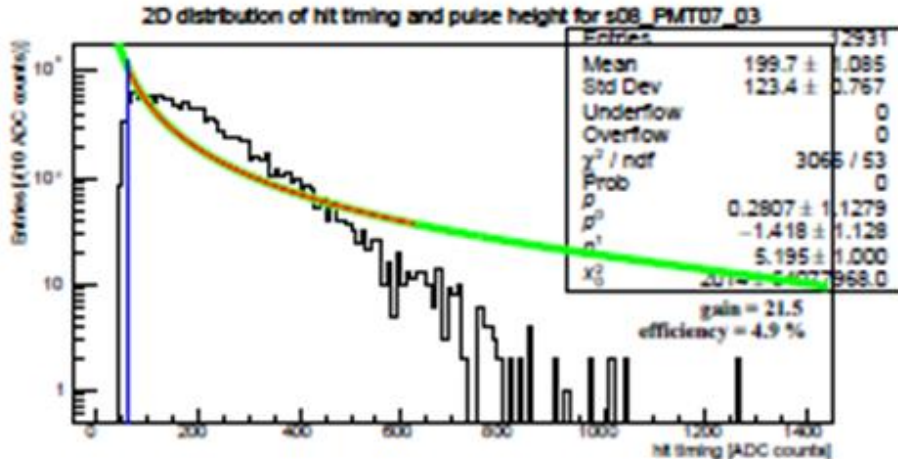
Problem of Parameter p1

22

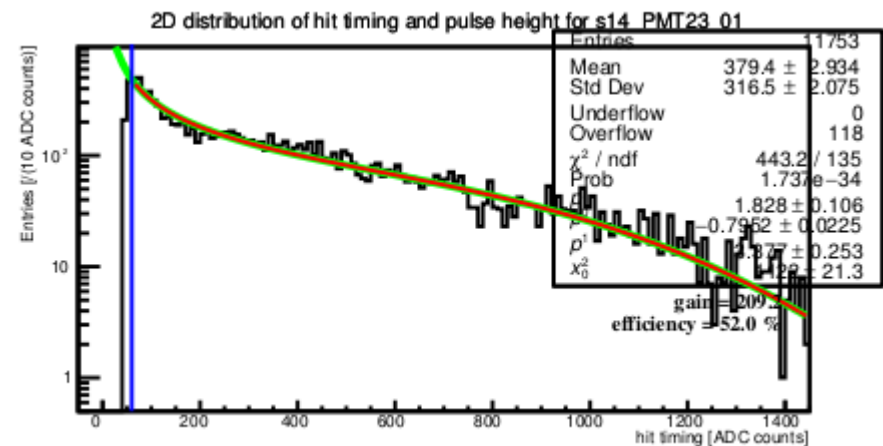
$$p_0 \left(\frac{x}{x_0} \right)^{p_1} \exp \left(- \left(\frac{x}{x_0} \right)^{p_2} \right)$$

- Where $p_1 < 0$, the function will ∞ around $x=0$

case 1



case 2



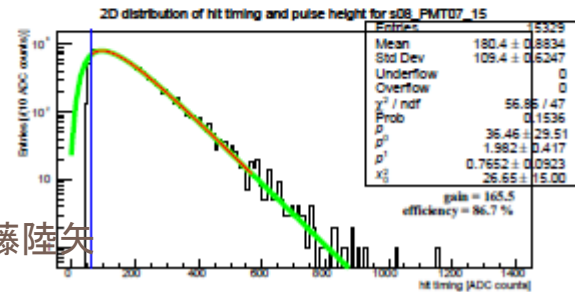
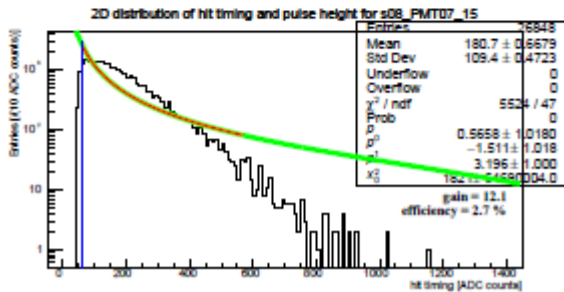
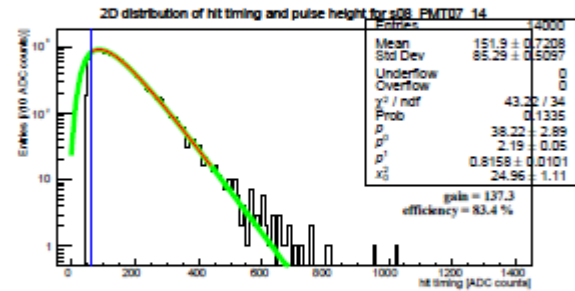
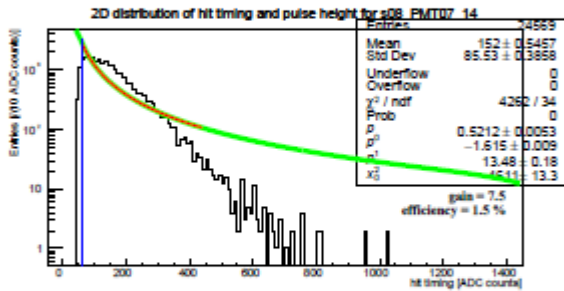
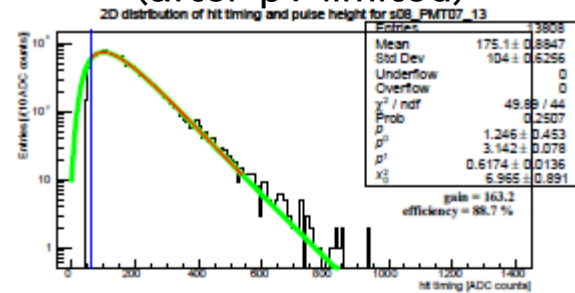
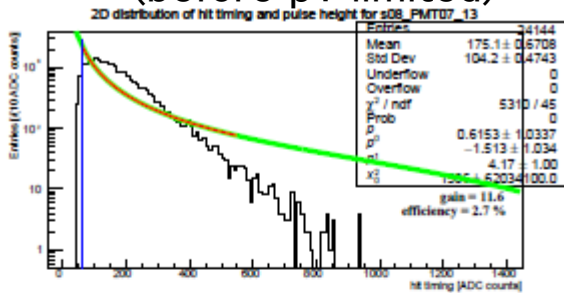
Regardless whether fitting success or not, Efficiency/Gain become much lower.

case 1 occurs easily when ADC distribution is relatively large.

Parameter limit result

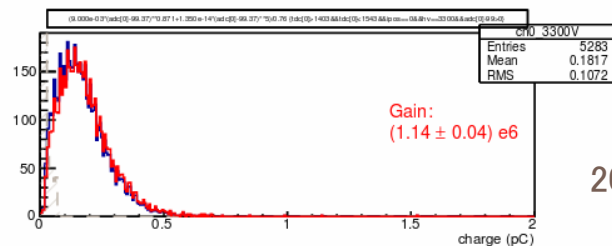
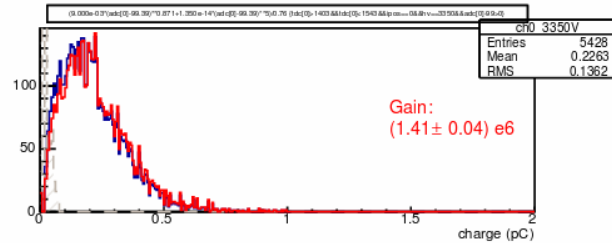
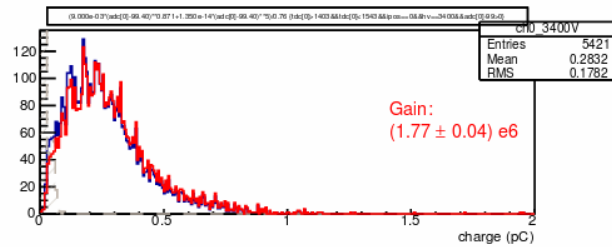
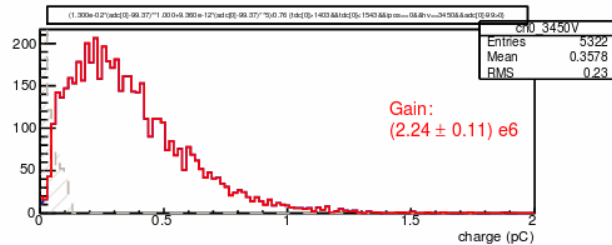
- Where $p1 \geq 0$, some fit results are improved
- worse result (before p1 limited)
- better result (after p1 limited)

For example slot08



ADC distribution at Nagoya

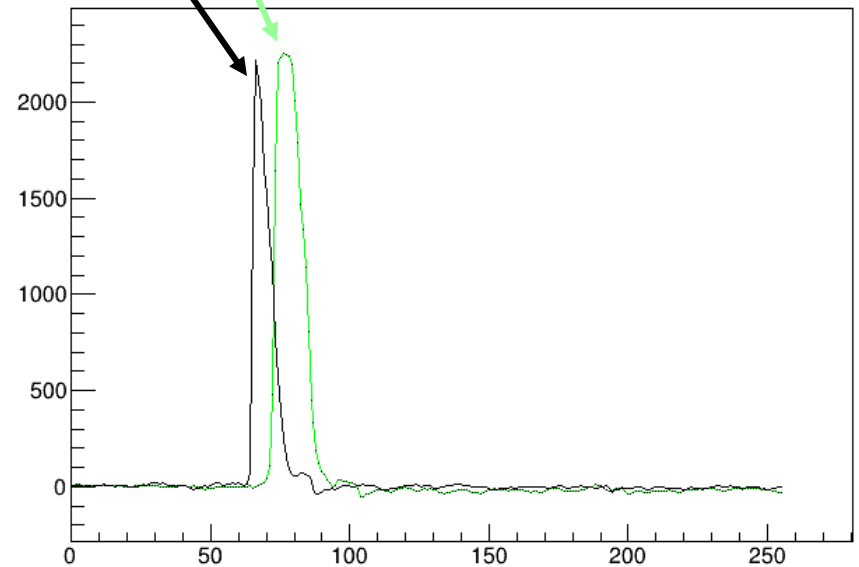
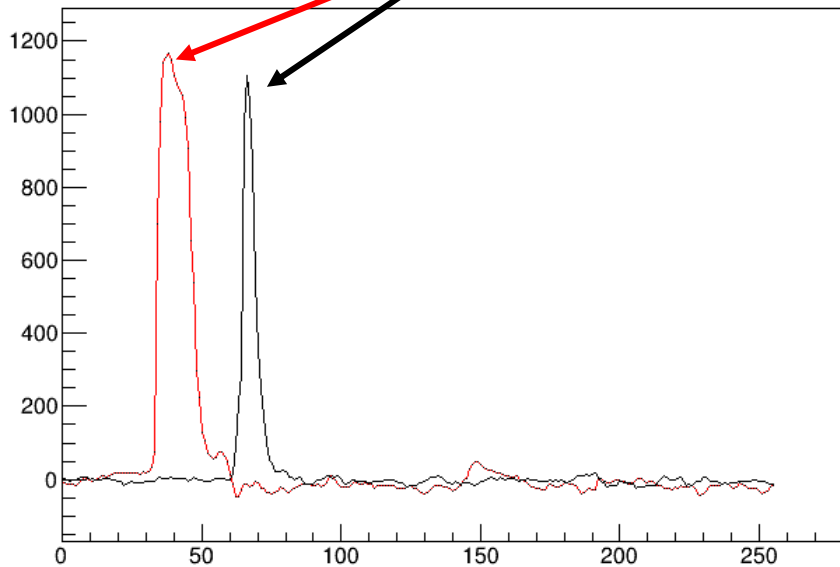
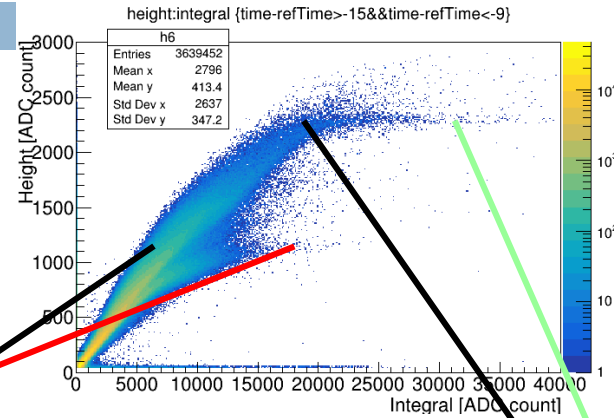
24



To compare the TOP data with Nagoya data, p1 should be >0

waveform comparison

25

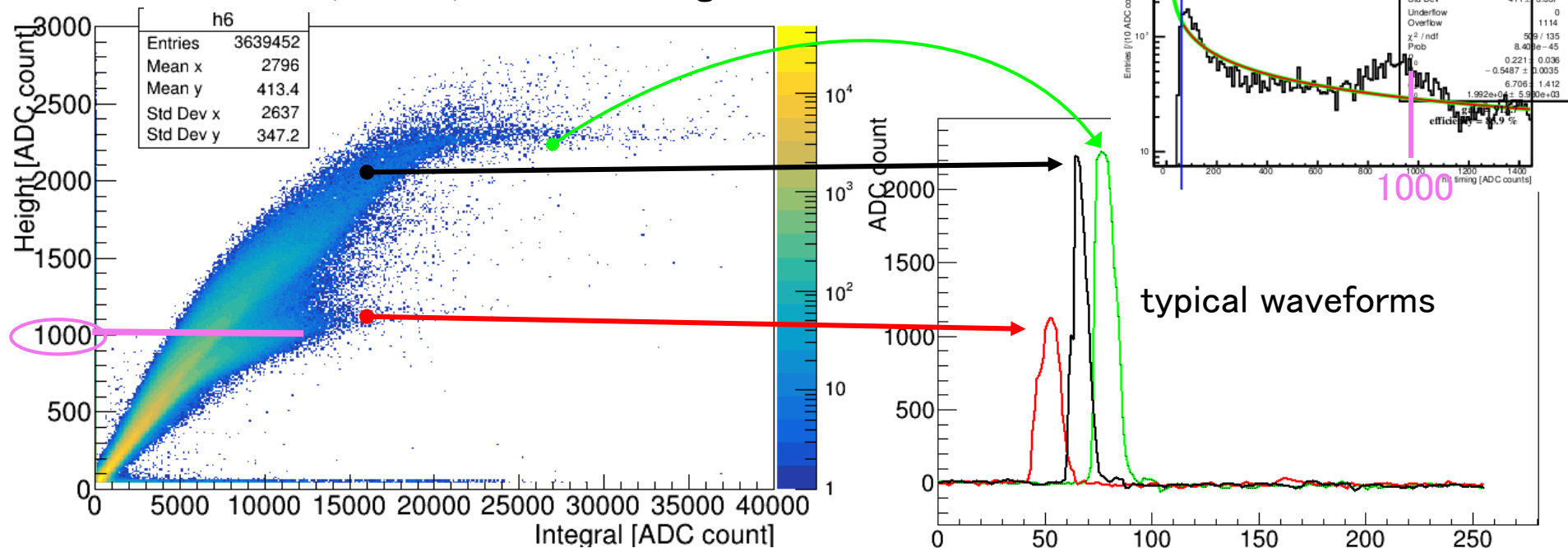


波高-電荷の線形性

26

- TOPカウンターではデータ量の観点から、オペレーション中は積分電荷量を取得しない(レーザー測定では取得している)
- 読み出し回路の飽和により、ピークが作られる
- 大まかに2種類の飽和がみえている

run004924, slot14, laser hit timing



2種類の飽和の分離

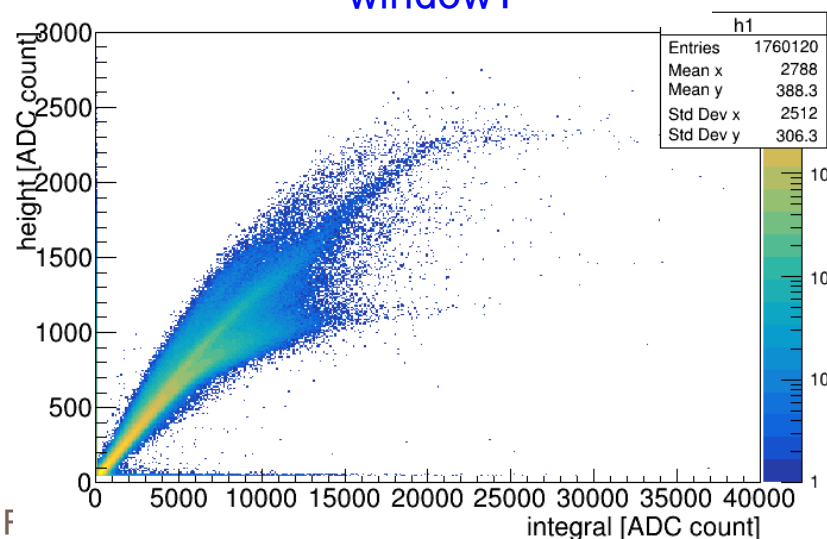
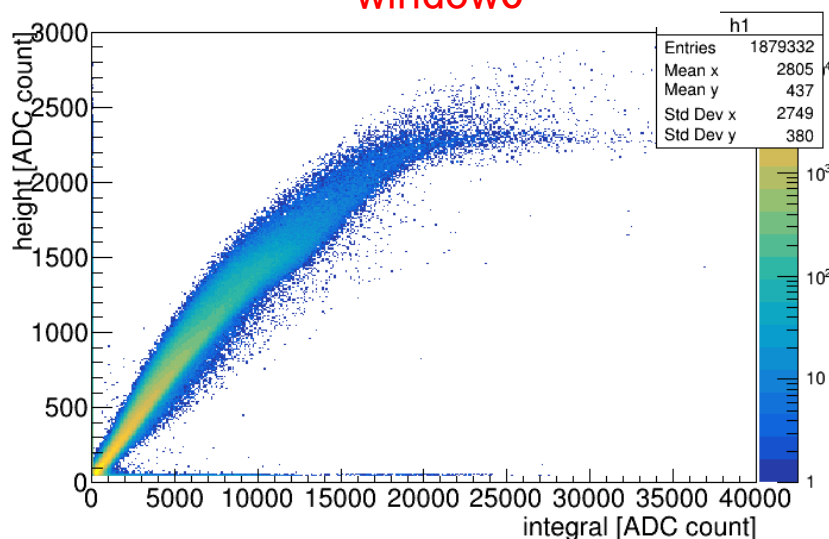
27

- TOPカウンターでは、二つのwindowを交互に使うって波形をサンプリングして読み取る

- 512windowで1周期

window0 [0] → window1 [1] → window0 [2] → window1 [3] … [511]

- 波高がwindow0/window1のどちらに入るかで飽和が異なる



- window0のデータのみを用いてフィットすればよい！

- これでバイアスを生むことはない(閾値が~100以下のため)
- 左肩の不自然な盛り上がりは未解決