

CTA 報告 90: CTA 大口径望遠鏡初号機用 PMT 信号の高精度測定

高橋光成^A, 猪目祐介^B, 梅津陽平^C, 大岡秀行^A, 荻野桃子^A, 折戸玲子^D, 片桐秀明^E, 櫛田淳子^C, 窪秀利^F, 郡司修一^G, 小山志勇^H, 澤田真理^I, 辻本晋平^C, 坪根善雄^I, 手嶋政廣^{A,J}, 寺田幸功^H, 友野弥生^C, 中嶋大輔^A, 永吉勤^H, 西嶋恭司^C, 花畑義隆^A, 林田将明^A, 馬場彩^I, 松岡俊介^H, 山本常夏^B, 他 CTA-Japan Consortium

東大宇宙線研^A, 甲南大理工^B, 東海大理^C, 徳島大総科^D, 茨城大理^E, 京大理^F, 山形大理^G, 埼玉大理^H, 青山大理工^I, Max-Planck-Inst.fuer Phys.^J

Introduction

Cherenkov Telescope Array 大口径望遠鏡 (LST)

要求

エネルギー閾値: $< 20\text{GeV}$

エネルギー分解能: $< 40\%$ @ 30GeV

高感度・高光量
分解能の光検出器

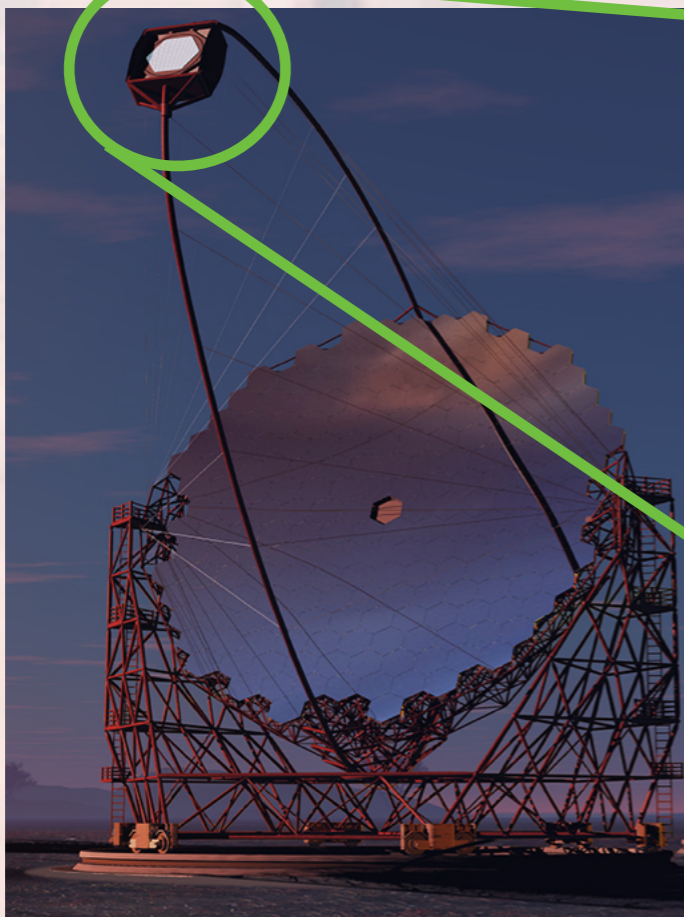
大口径(23M)
の反射鏡

CTA Report 86 (H. Kubo)

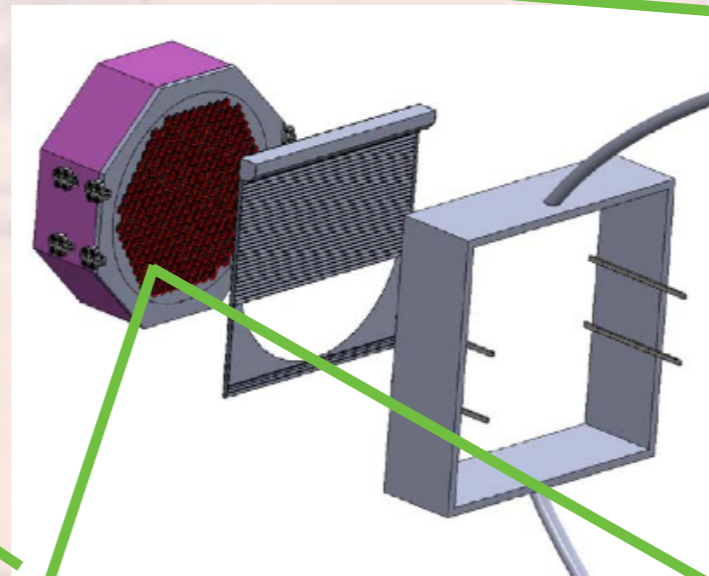
南北に4基ずつ建設

A. Perrotta

大口径望遠鏡 焦点面カメラ



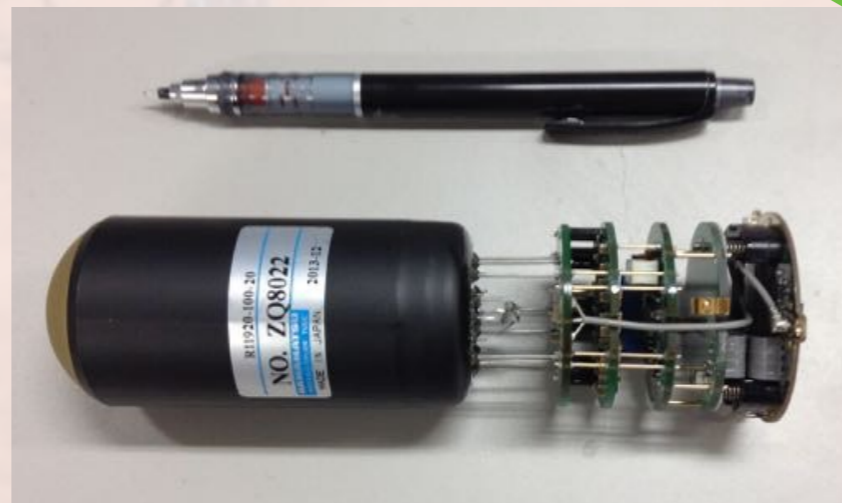
大口径望遠鏡
(LST)



CTA Report 89 (T. Nagayoshi)

焦点面カメラ

光電子増倍管1855本



光電子増倍管 (PMT) R11920

(株) 浜松ホトニクス

量子効率ピーク値: 平均41%

PMTの高精度測定

目的

- より低いエネルギー閾値
- より高いエネルギー分解能

カメラ内の各PMT
配置を最適化

各PMTに入射した
光電子数決定精度向上

モンテカルロシミュレー
ションの精度向上

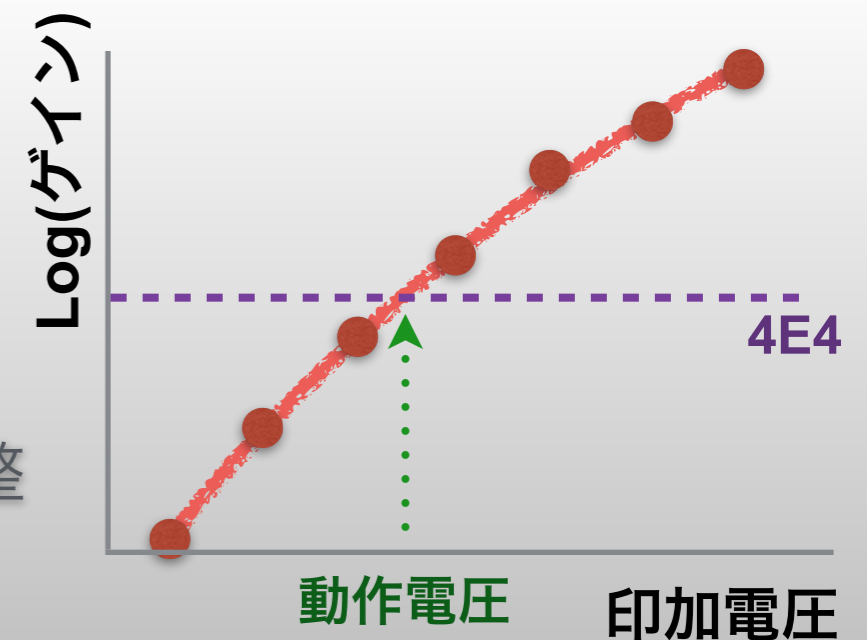
PMTの高精度測定

測定項目

ゲイン

$$= (\text{Signal at the output}) / (\text{Signal at the input})$$

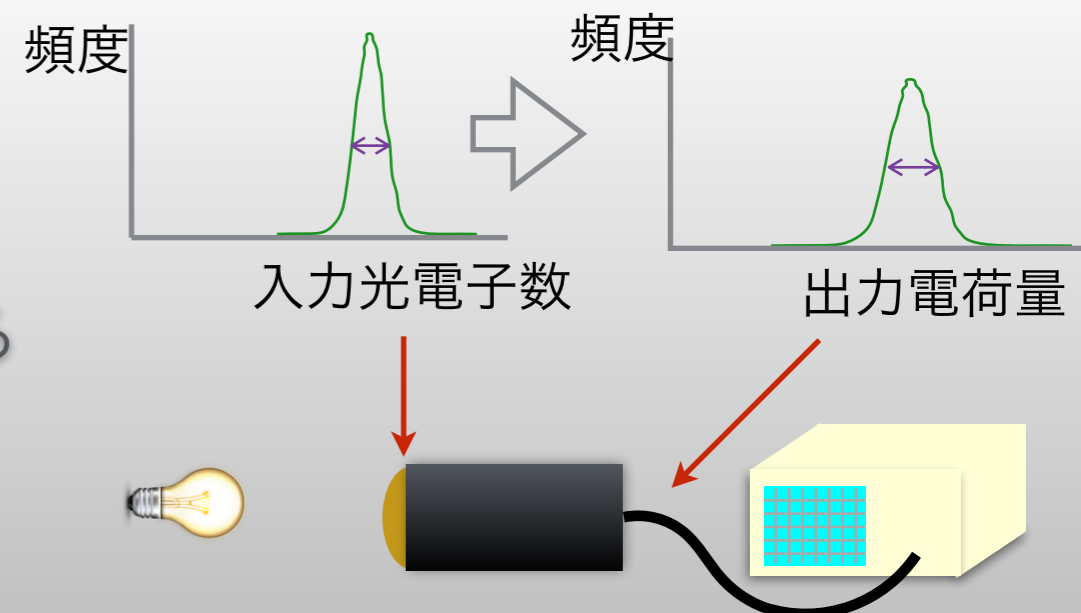
- 出力電荷量 / ゲイン / 素電荷 = 入射光電子数
- 印加電圧 850 - 1000 V で測定
- 観測時はゲインが 4×10^4 となるように印加電圧を調整
- 外部要因や経年により変化するため観測時に較正



F ファクター (Excess noise factor)

$$= (N/S \text{ at the output}) / (N/S \text{ at the input})$$

- 観測時のゲイン較正に有用
- 主に第1段ダイノードでの放出電子数で決まる
- ほとんど変化しない



観測時のPMTゲイン較正

❖ レーザーなどを一定光量でカメラに照射

式 1

$$\text{入射光電子数の平均} \times \text{素電荷} \times \text{PMTゲイン} \times \text{アンプゲイン} = \text{出力電荷の平均}$$

式 2

絶対値は不明

求める量

測定量

$$\frac{\sqrt{\text{入射光電子数の平均}}}{\text{入射光電子数の平均}} \times F = \frac{\text{出力電荷の標準偏差}}{\text{出力電荷の平均}}$$

↑
ポアソン分布を仮定

↑
予め測定

測定方法

アイディア

❖ レーザーなどを一定光量でPMTに照射

式 1

$$\text{入射光電子数の平均} \times \text{素電荷} \times \text{PMTゲイン} \times \text{アンプゲイン} = \text{出力電荷の平均}$$

式 2

何らかの方法で定める

求める量

測定量

$$\frac{\sqrt{\text{入射光電子数の平均}}}{\text{入射光電子数の平均}} \times F = \frac{\text{出力電荷の標準偏差}}{\text{出力電荷の平均}}$$

ポアソン分布を仮定

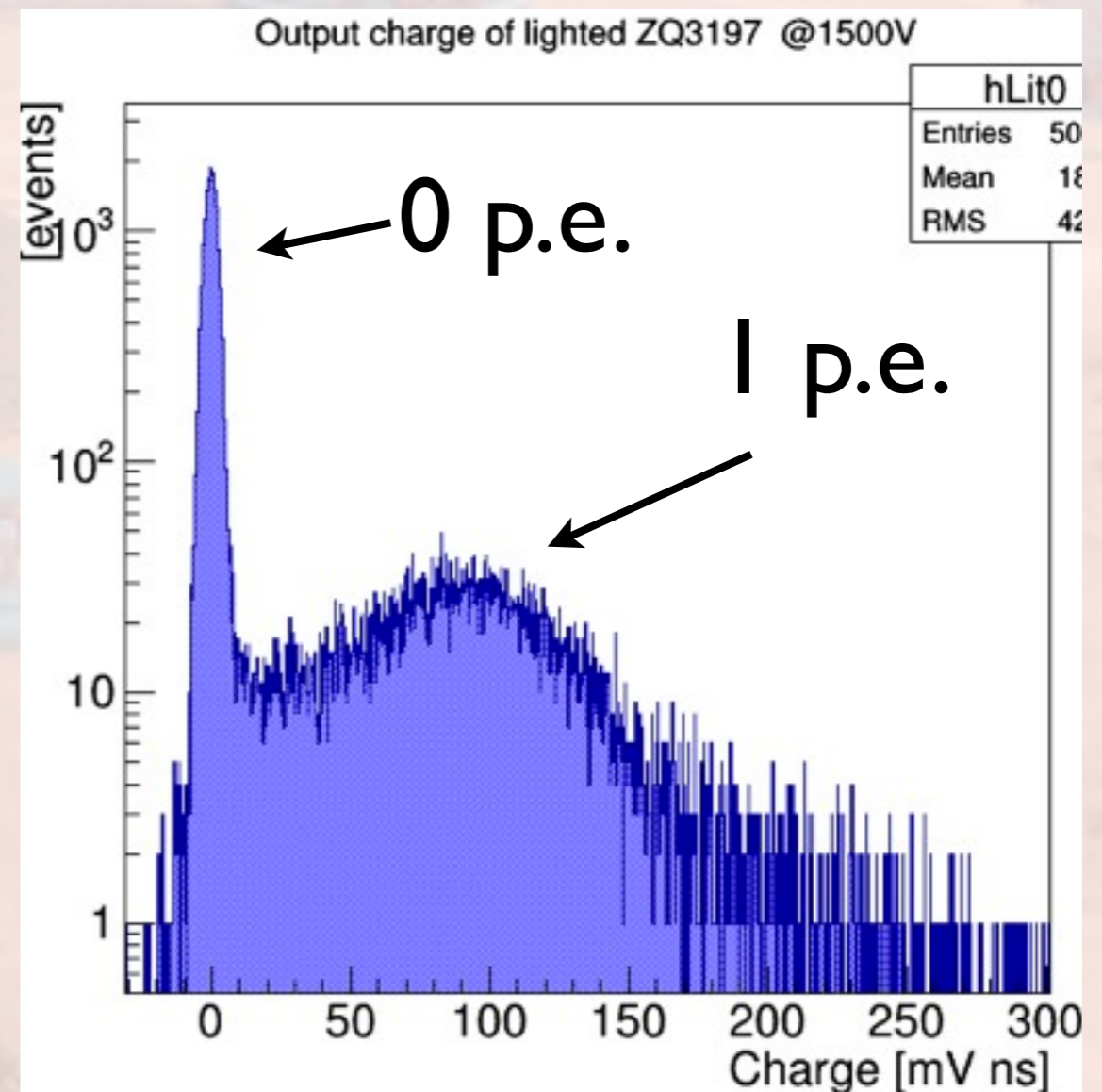
低強度の光による測定

- ❖ 光の強度が十分弱いと出力電荷分布に 0光電子, 1光電子, 2光電子, ... のピーク



- ❖ 入射光電子数と出力電荷量の関係

出力電荷分布 @1500V

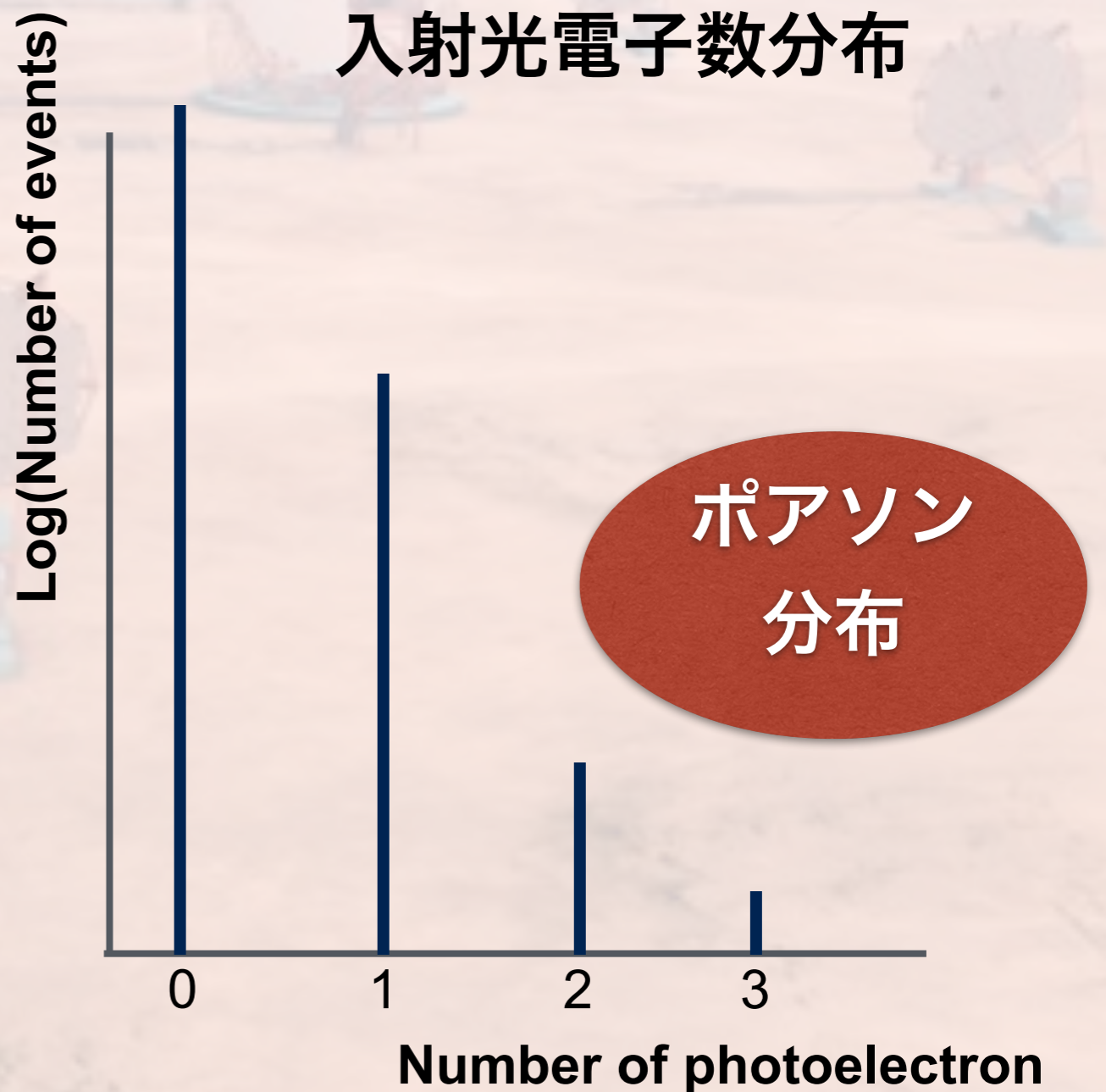


低強度の光による測定

- ❖ 光の強度が十分弱いと出力電荷分布に 0光電子, 1光電子, 2光電子, ... のピーク



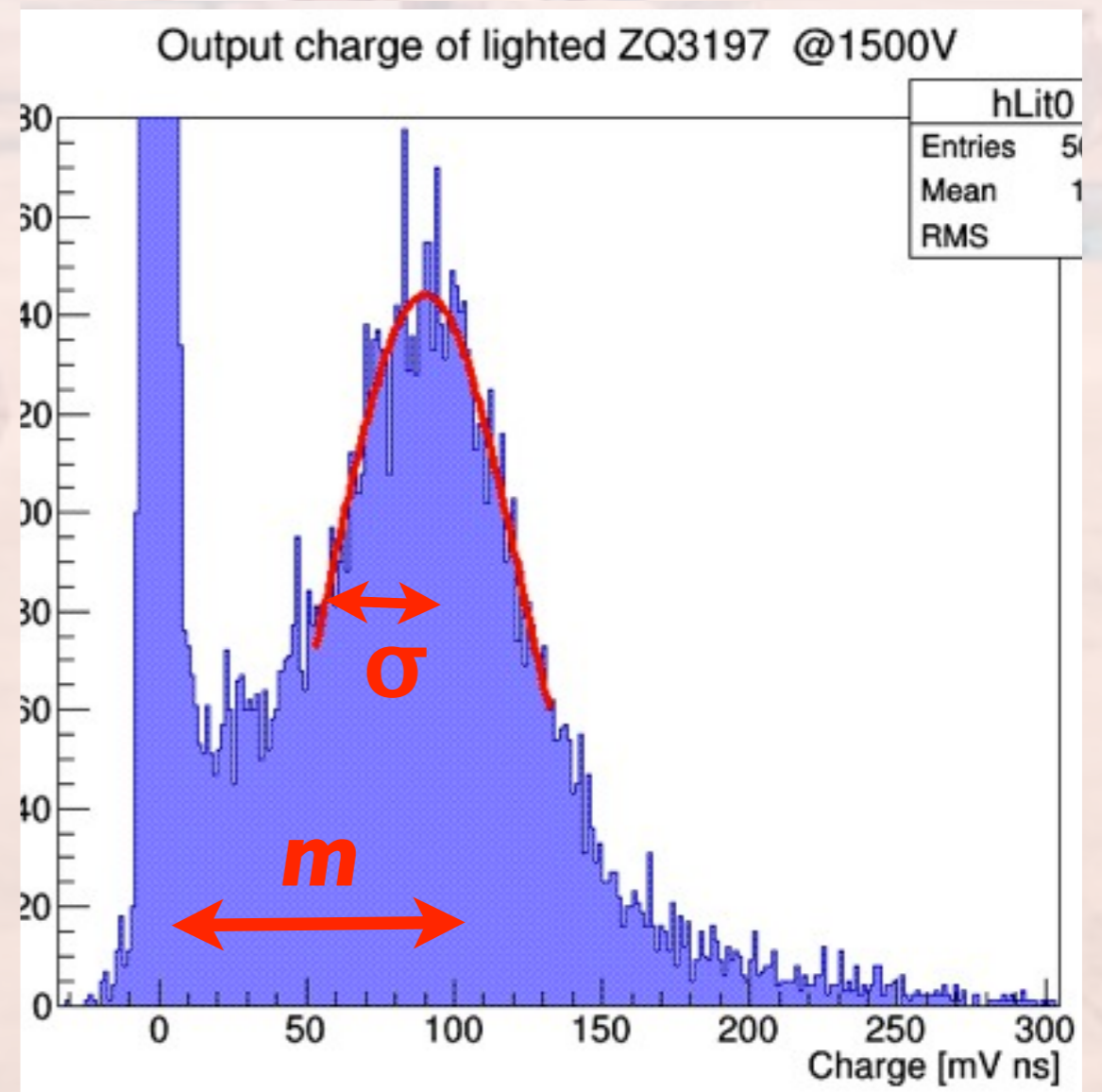
- ❖ 入射光電子数と出力電荷量の関係



ガウス関数によるフィッティング

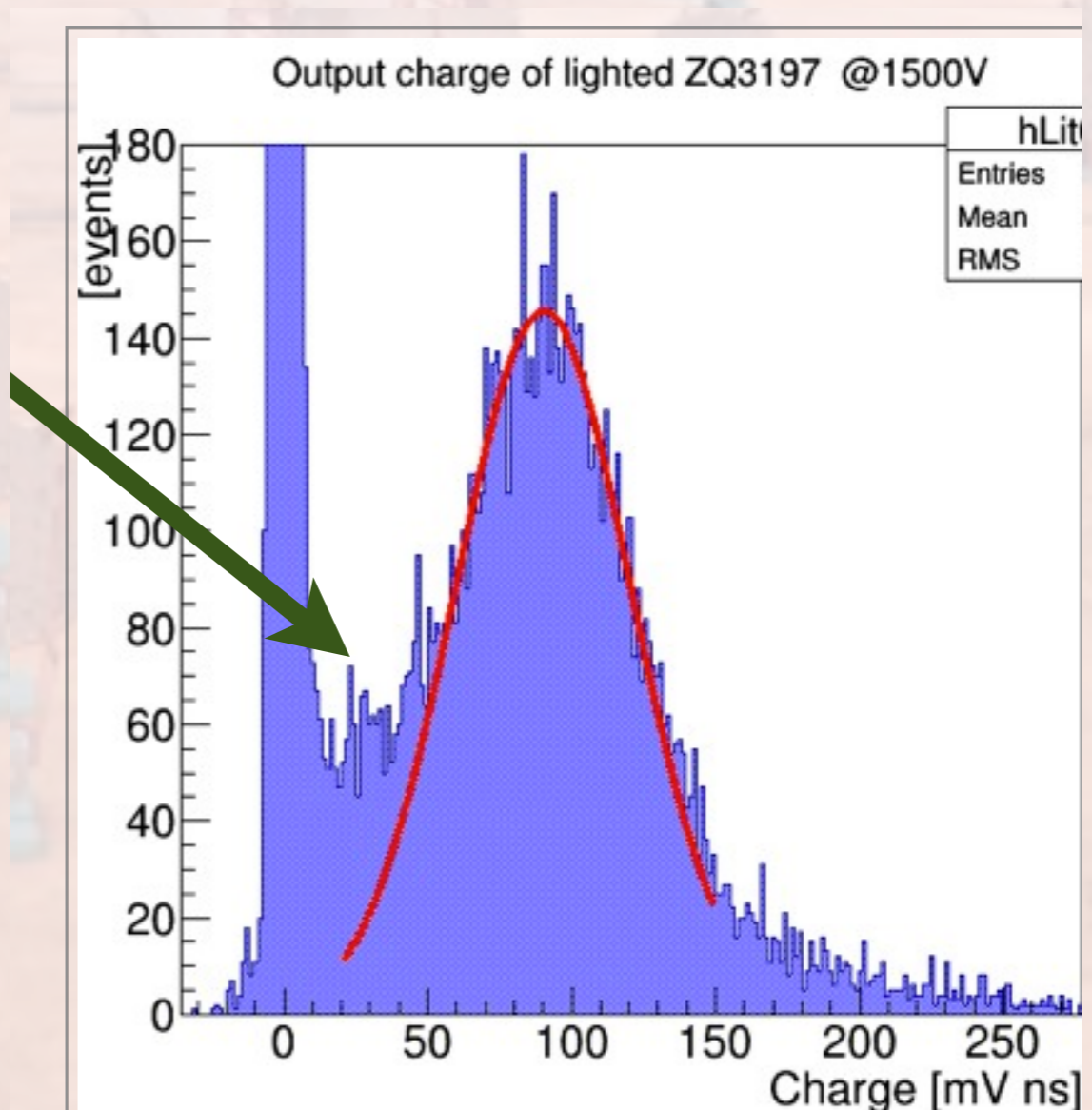
- ❖ 単純には、1光電子のピークをガウス関数でフィッティング
- ❖ 1光電子だけの分布に対する式を使用
 - ゲイン = $m / e /$ (アンプのゲイン)
 - $F^2 = 1 + \sigma^2 / m^2$

しかし.....



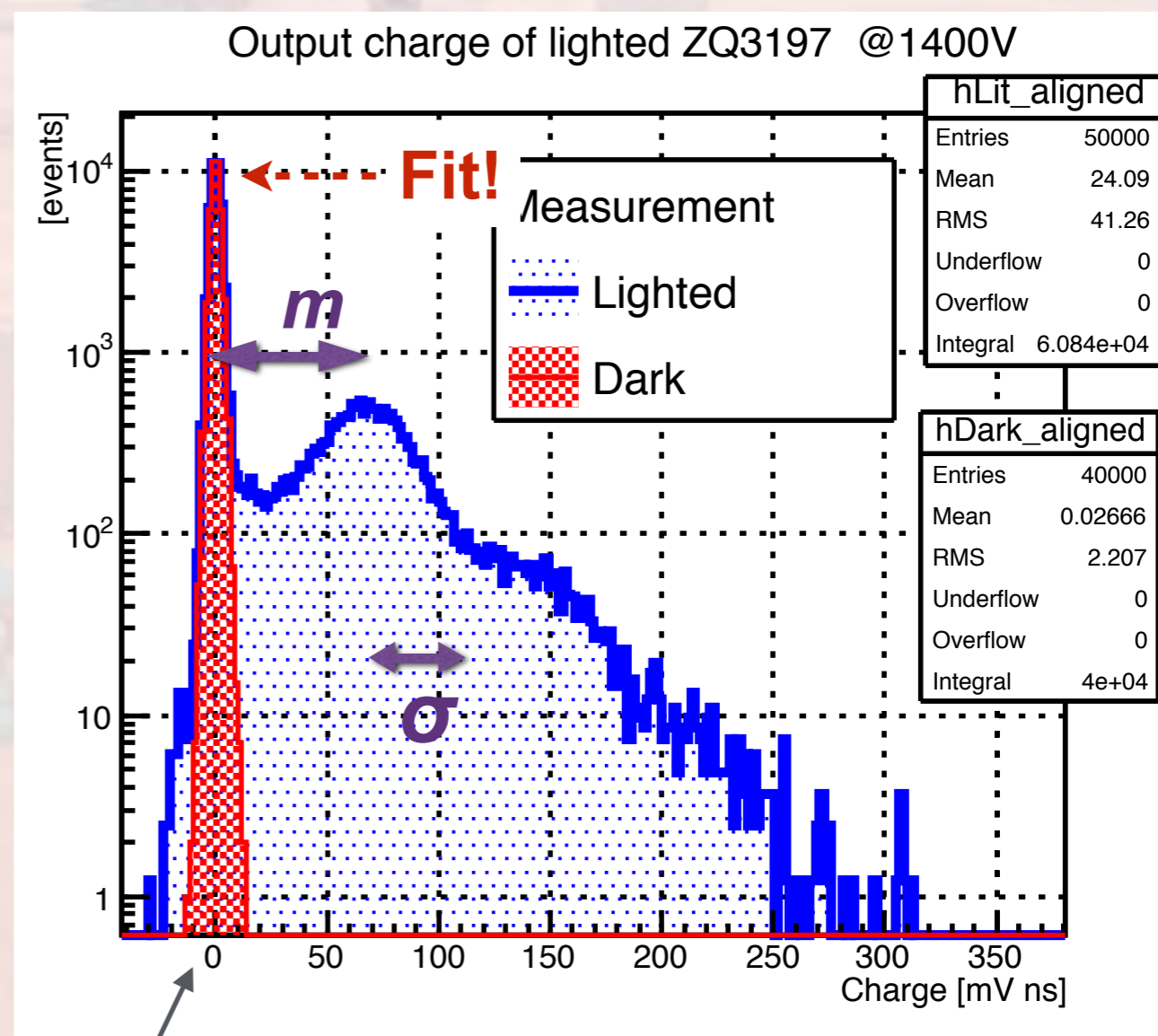
問題点：“準弾性散乱成分”

- ❖ 電荷0付近にガウシアンではない成分が存在
- ❖ 光電子の一部は第1ダイノードで準弾性的に衝突
 - ▶ 二次電子を放出させるエネルギーをほとんど与えない
 - ▶ こうしたイベントも1光電子として考慮すべき



ペDESTラルを差し引く方法

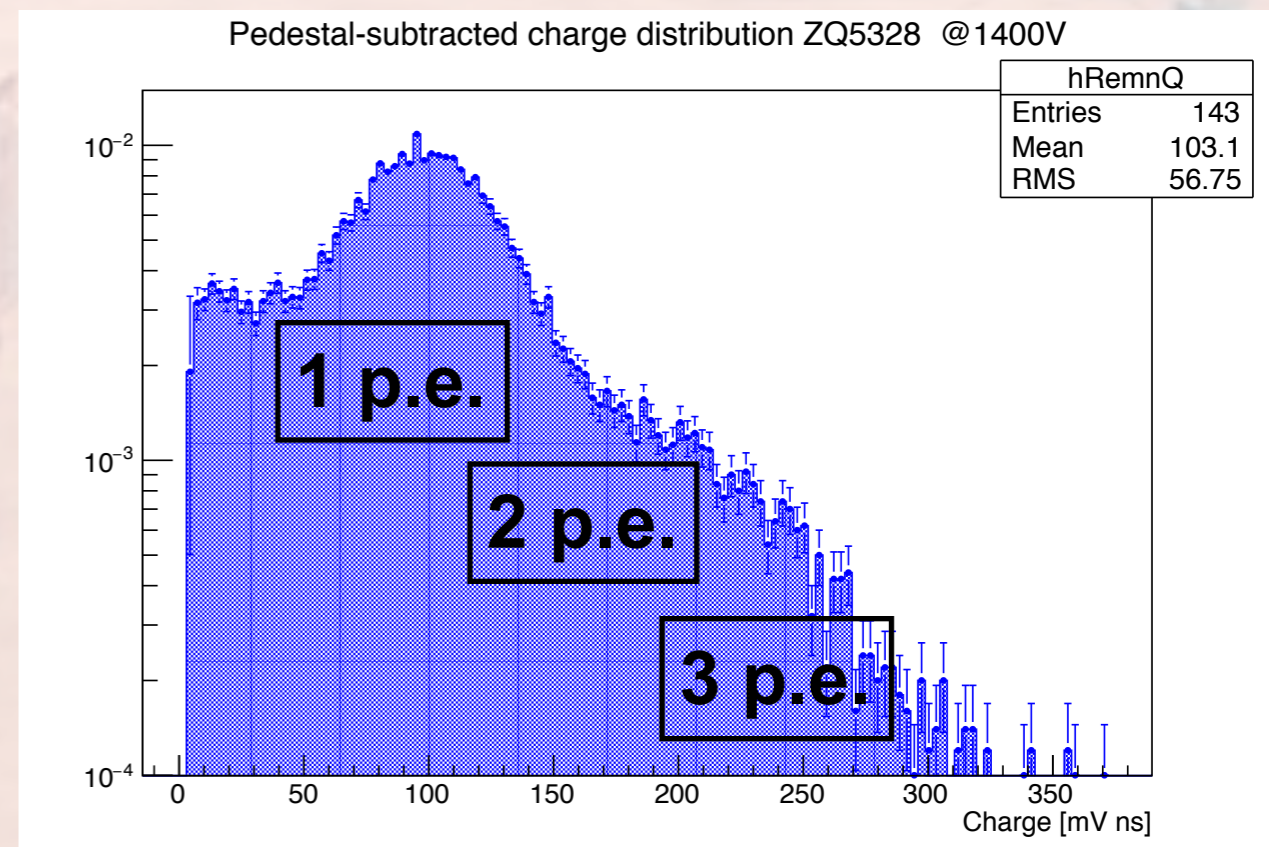
- ❖ PMTを遮光しての測定により、ペDESTラルの分布を作る
 - ▶ 電氣的なノイズのみ
- ❖ 0光電子のピークと高さを合わせた上で差し引く
- ❖ 残った分布の平均と標準偏差からゲイン、Fファクターを求める



光パルス入射直前 数百ns の
電圧値の中央値を原点にとる

問題点: 複数光電子イベントの混入

- ❖ 2光電子以上の成分も寄与してしまう
- ❖ 混入を抑えるために光量を極めて低くする
 - ▶ 測定が長時間かかる
- ❖ 排除できないか？



ポアソン分布を仮定して推定

全体の分布

=

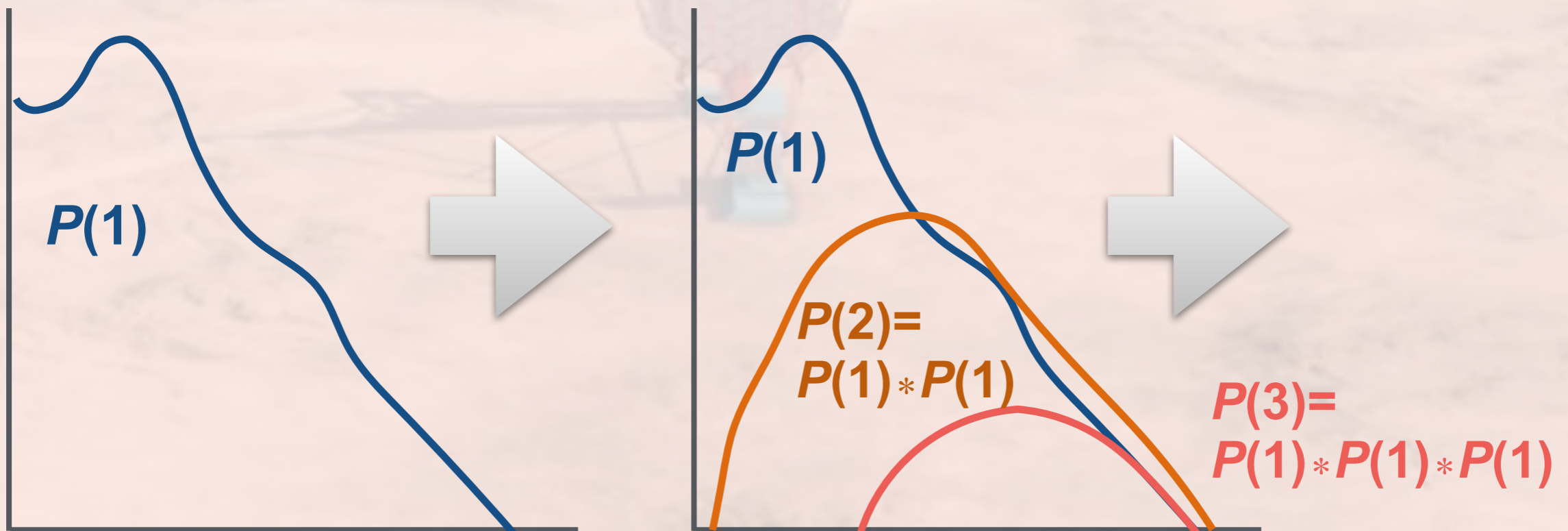
1光電子の分布

*

ポアソン分布

ペDESTラルを差し引いた分布が
すべて1光電子と仮定すると

2光電子、3光電子
分布を推定



ポアソン分布を仮定して推定

全体の分布

=

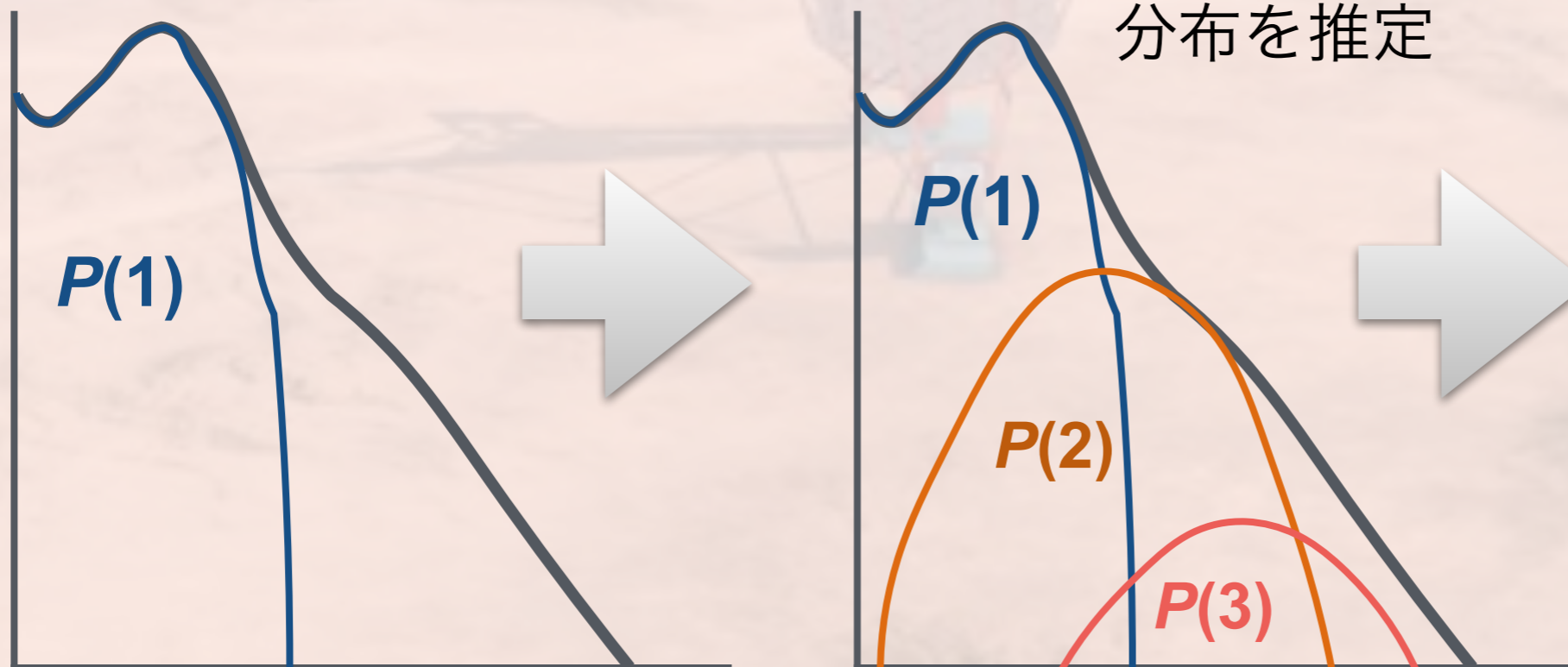
1光電子の分布

*

ポアソン分布

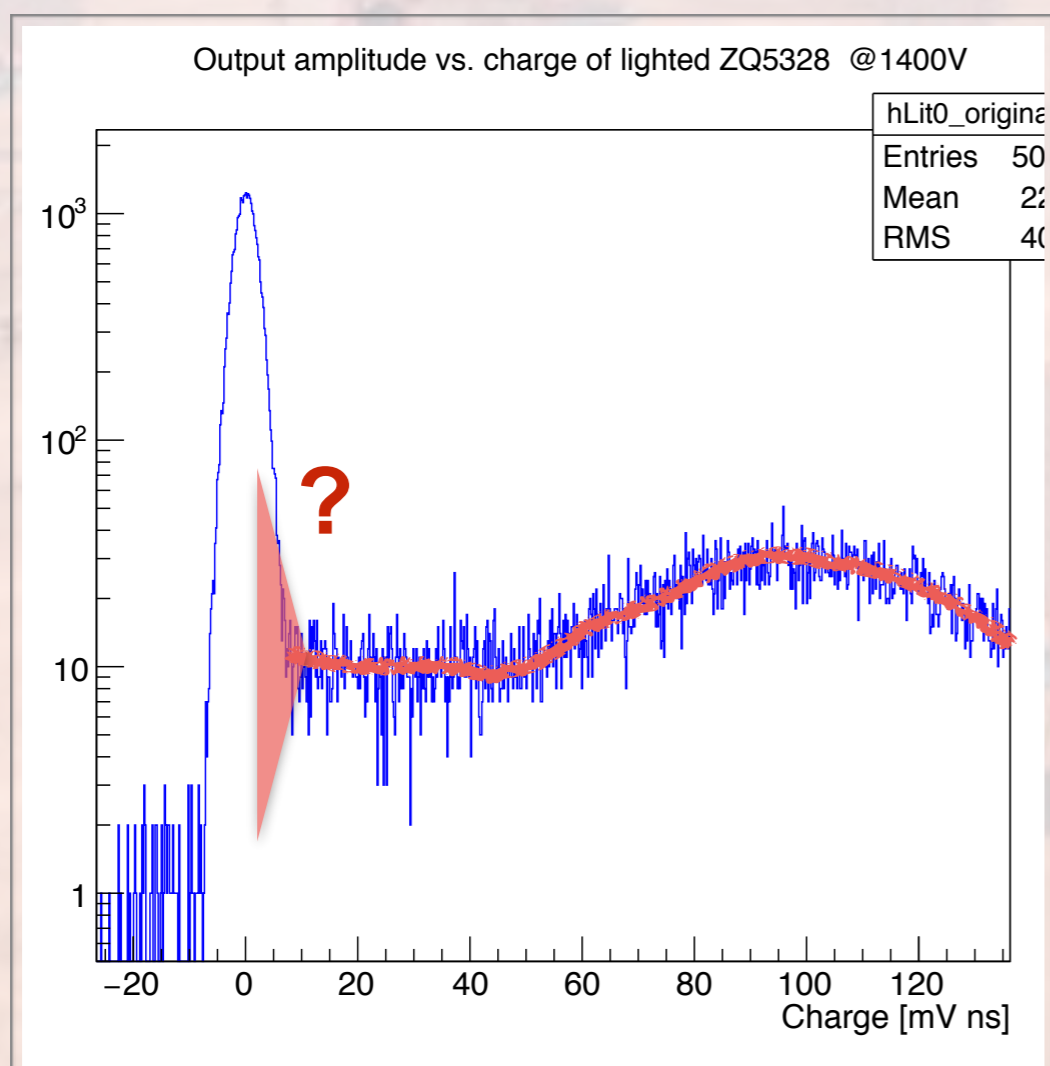
推定した 2光電子、3光電子成分を
差し引き、新しい1光電子分布を作る

再び2光電子、3光電子
分布を推定



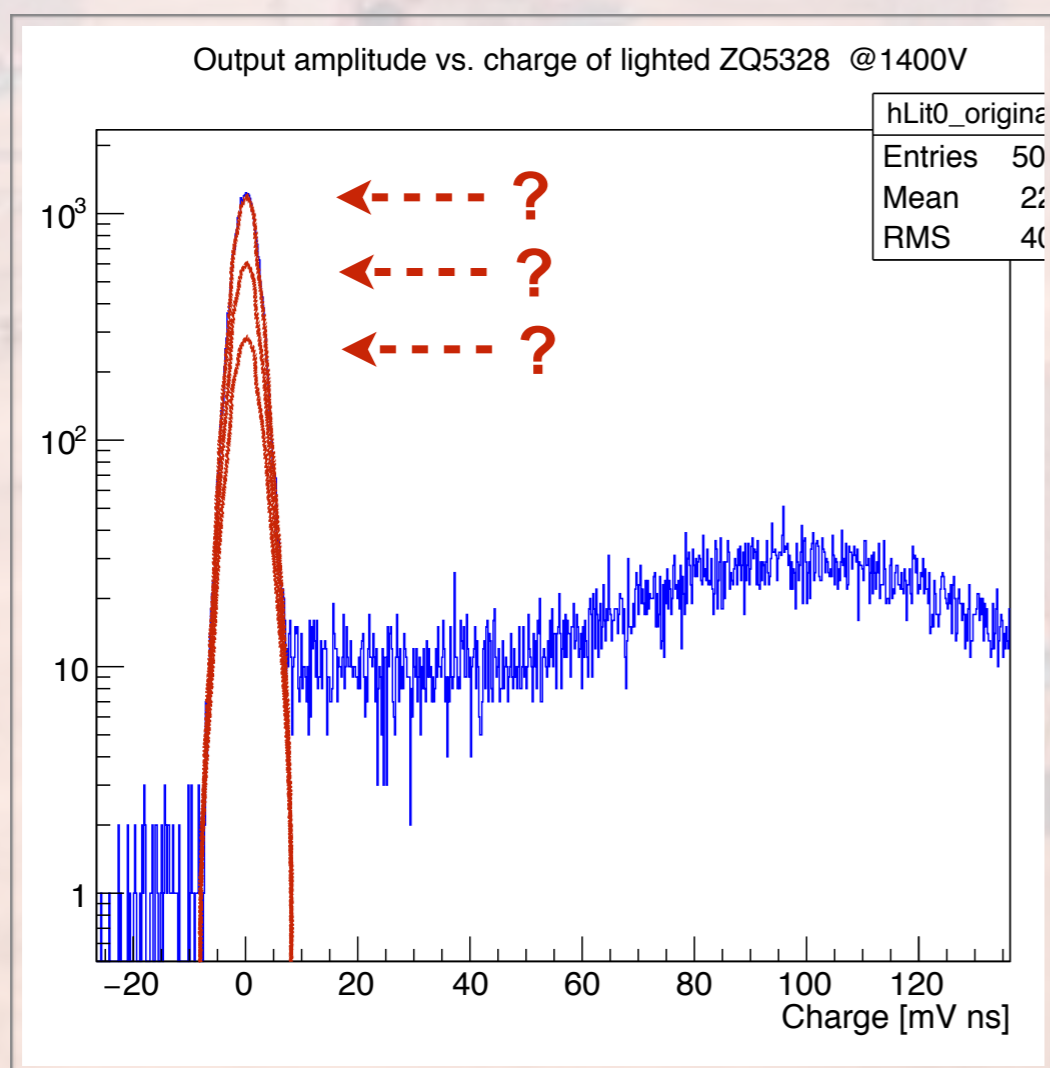
収束するまで
繰り返す

問題点: ペDESTALの差し引きは正しいか?



- ❖ 0光電子成分と重なる部分の分布がどうなっているか不明
- ❖ 0光電子成分の真の大きさも不明
- ❖ ペDESTALのスケールリングが正当化できない

問題点: ペDESTALのスケーリング



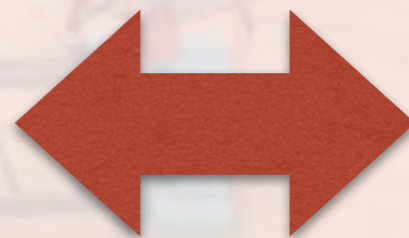
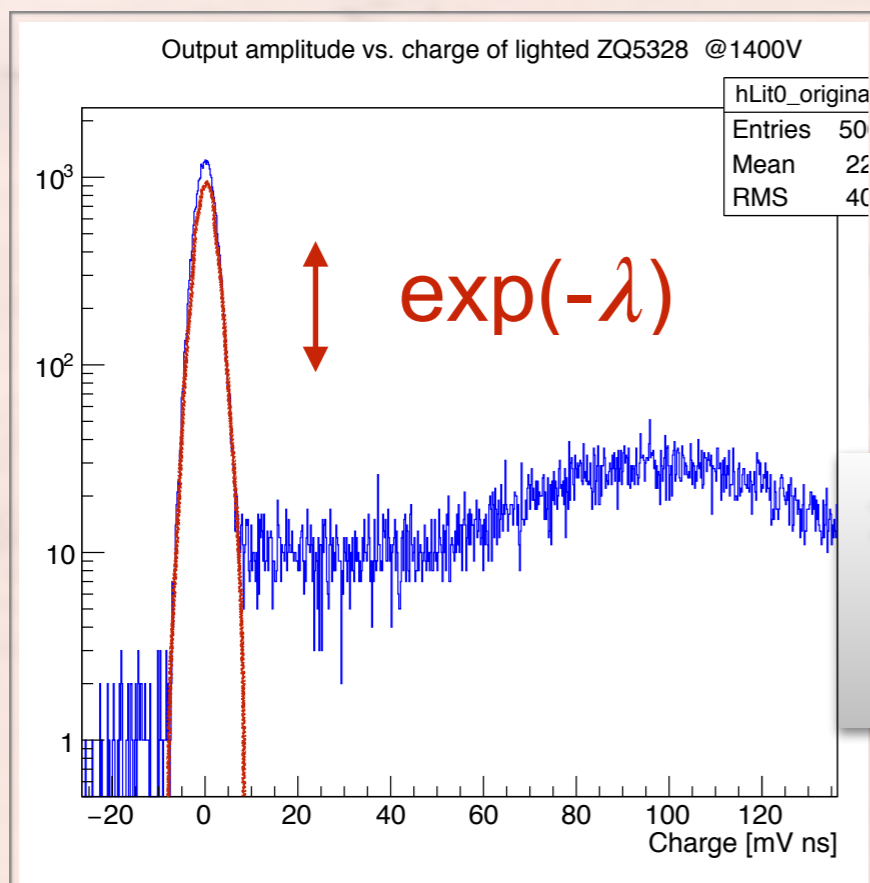
- ❖ 0光電子成分と重なる部分の分布がどうなっているか不明
- ❖ 0光電子成分の真の大きさも不明
- ❖ ペDESTALのスケーリングが正当化できない

ポアソンパラメーター λ を走査

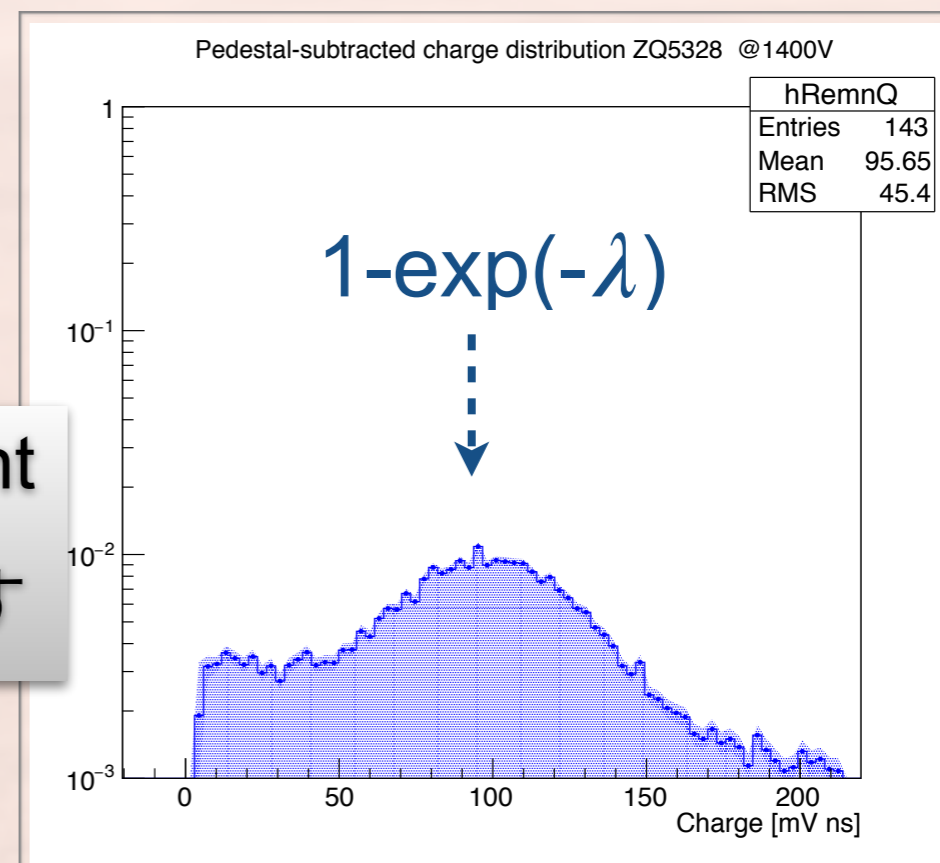
N は測定した全イベント数

❖ 0光電子分布の面積：
 $\exp(-\lambda)$

❖ 差し引いた分布の面積：
 $(1-\exp(-\lambda))$



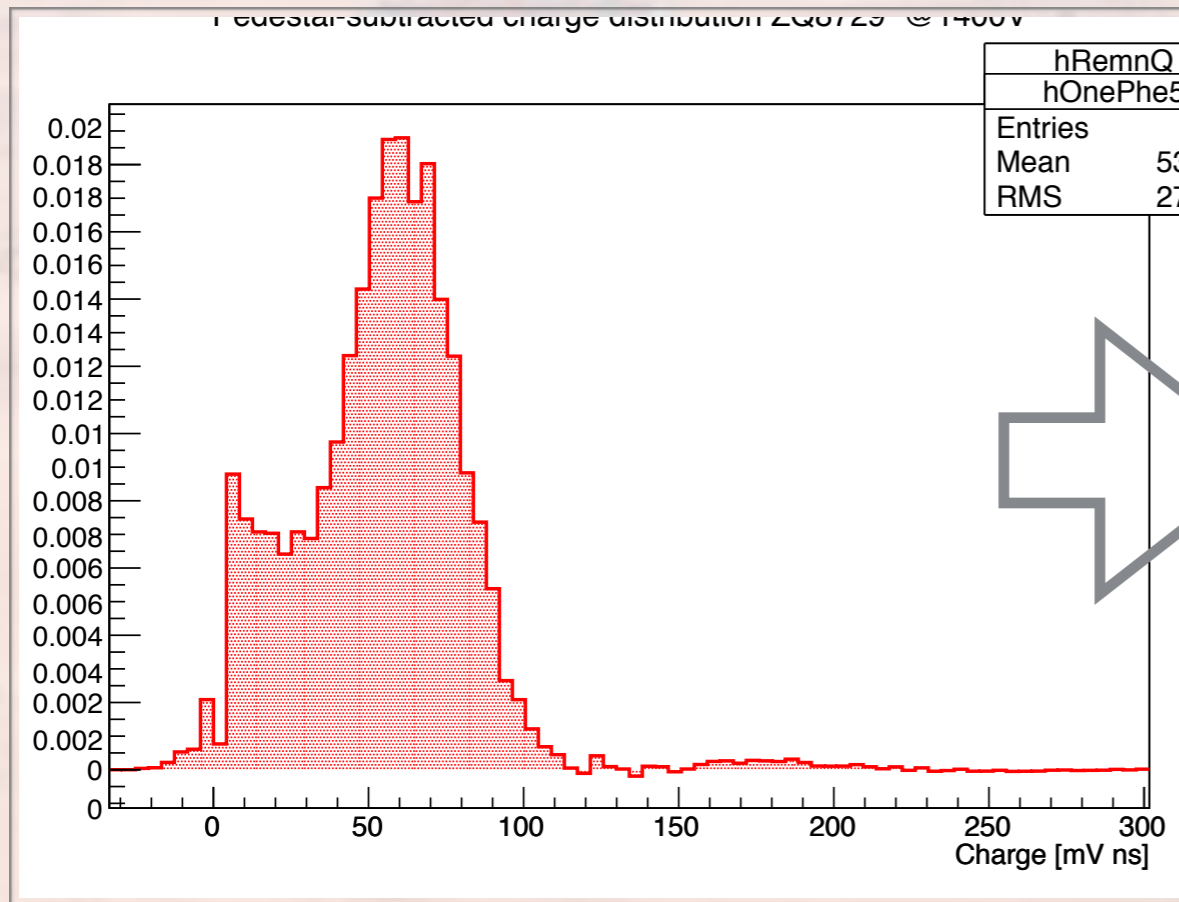
最も consistent
になる λ を探す



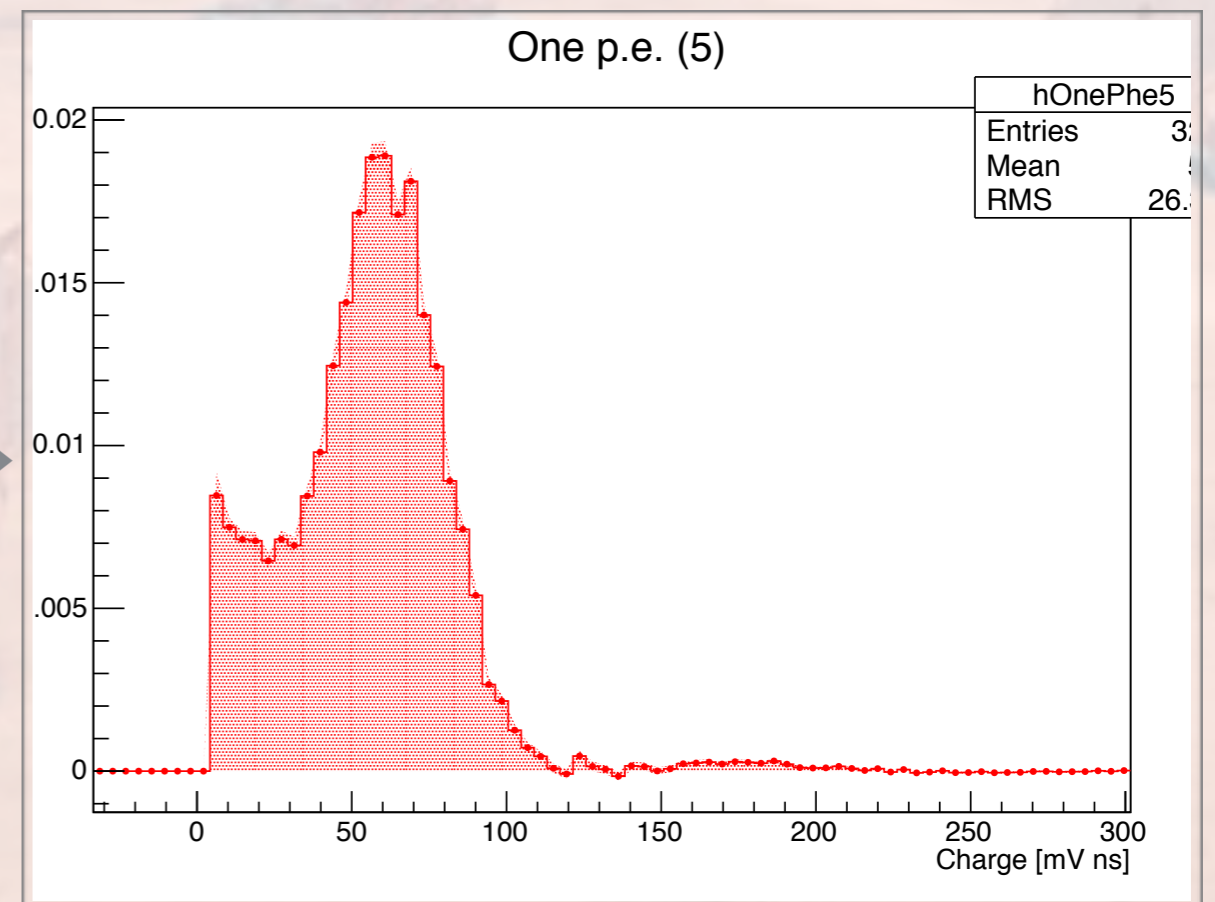
結果

λ の変更による 1光電子分布の違い

❖ λ 変更前



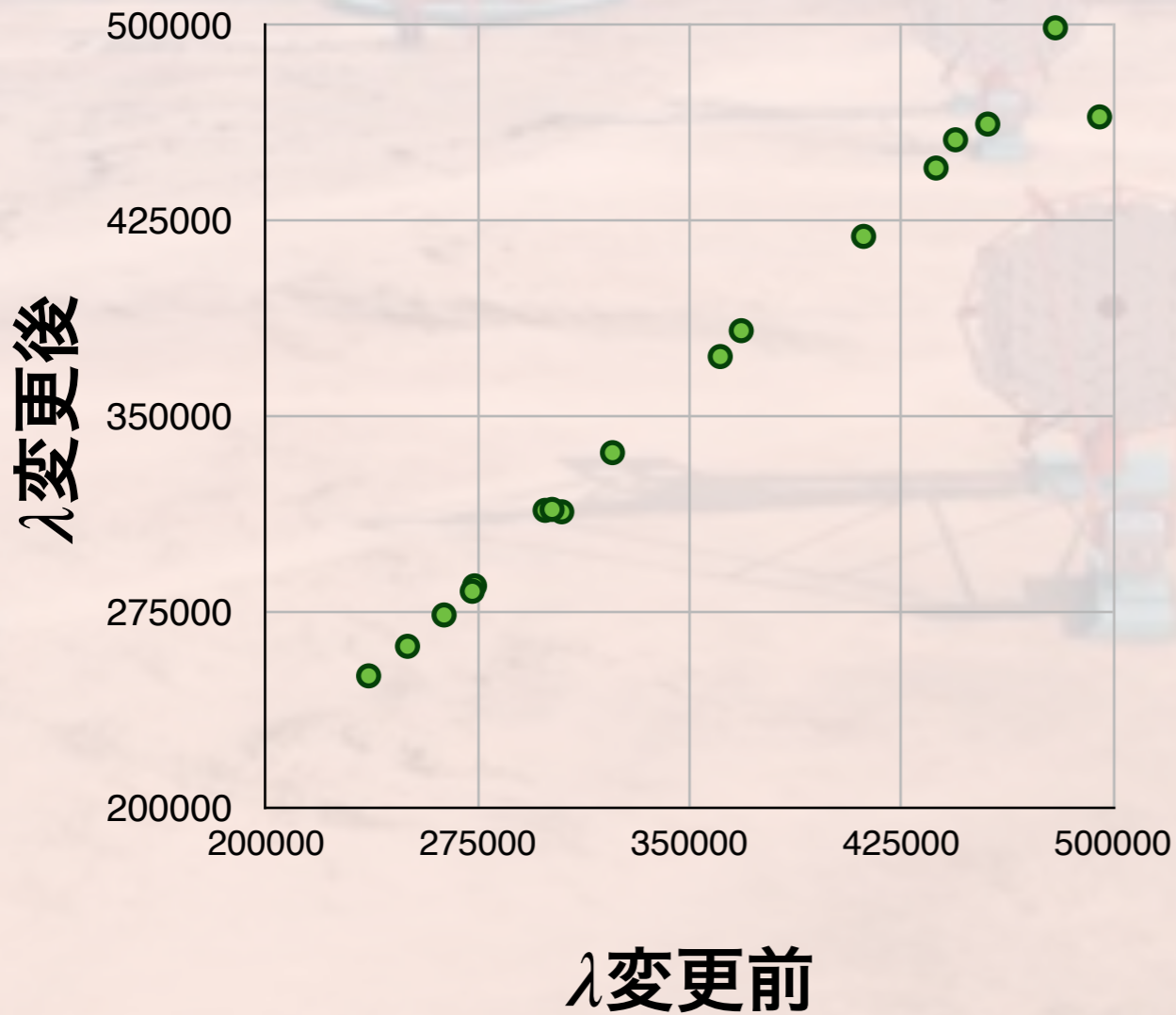
❖ λ 変更後



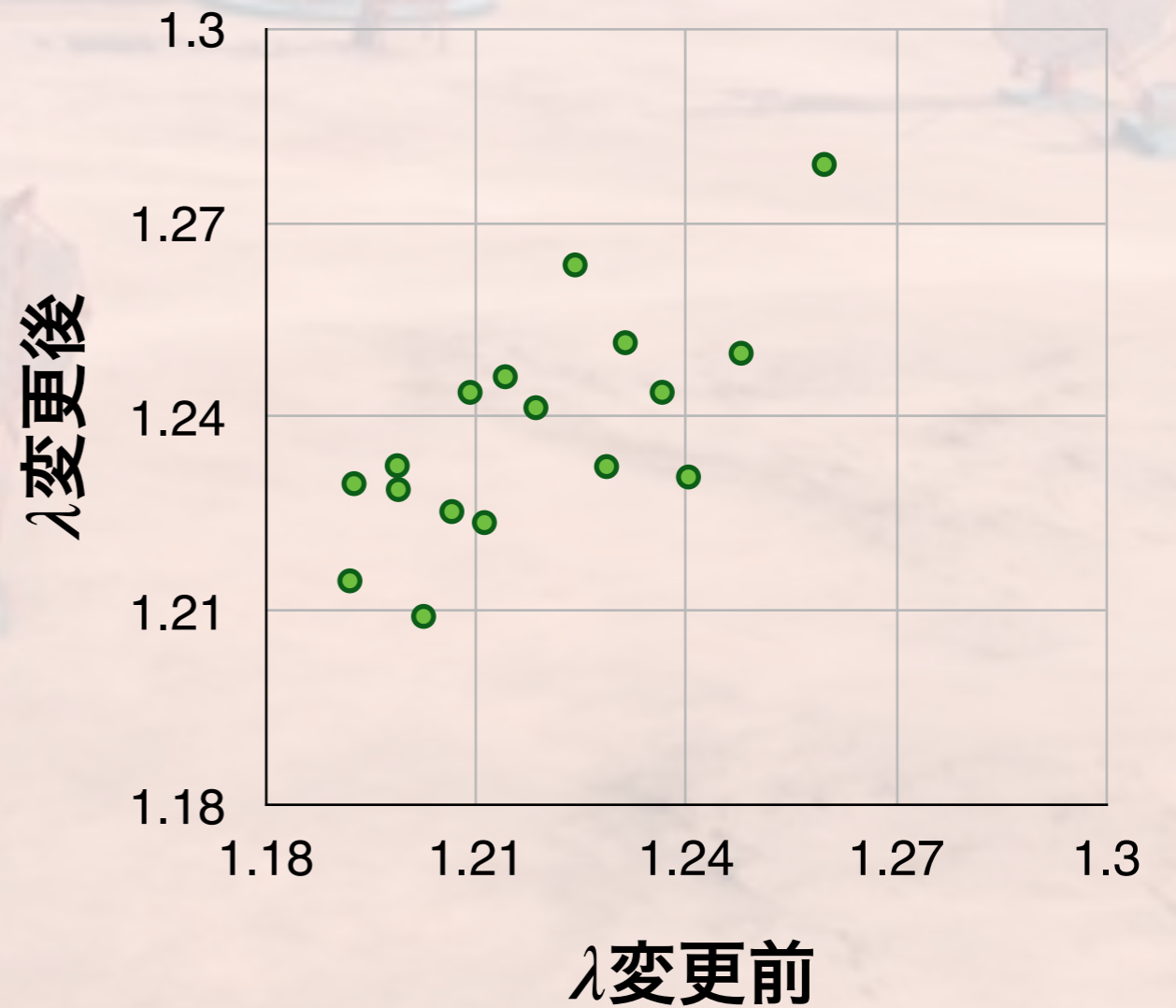
❖ それほど大きな違いは無かった

結果 (17本分)

❖ Gain



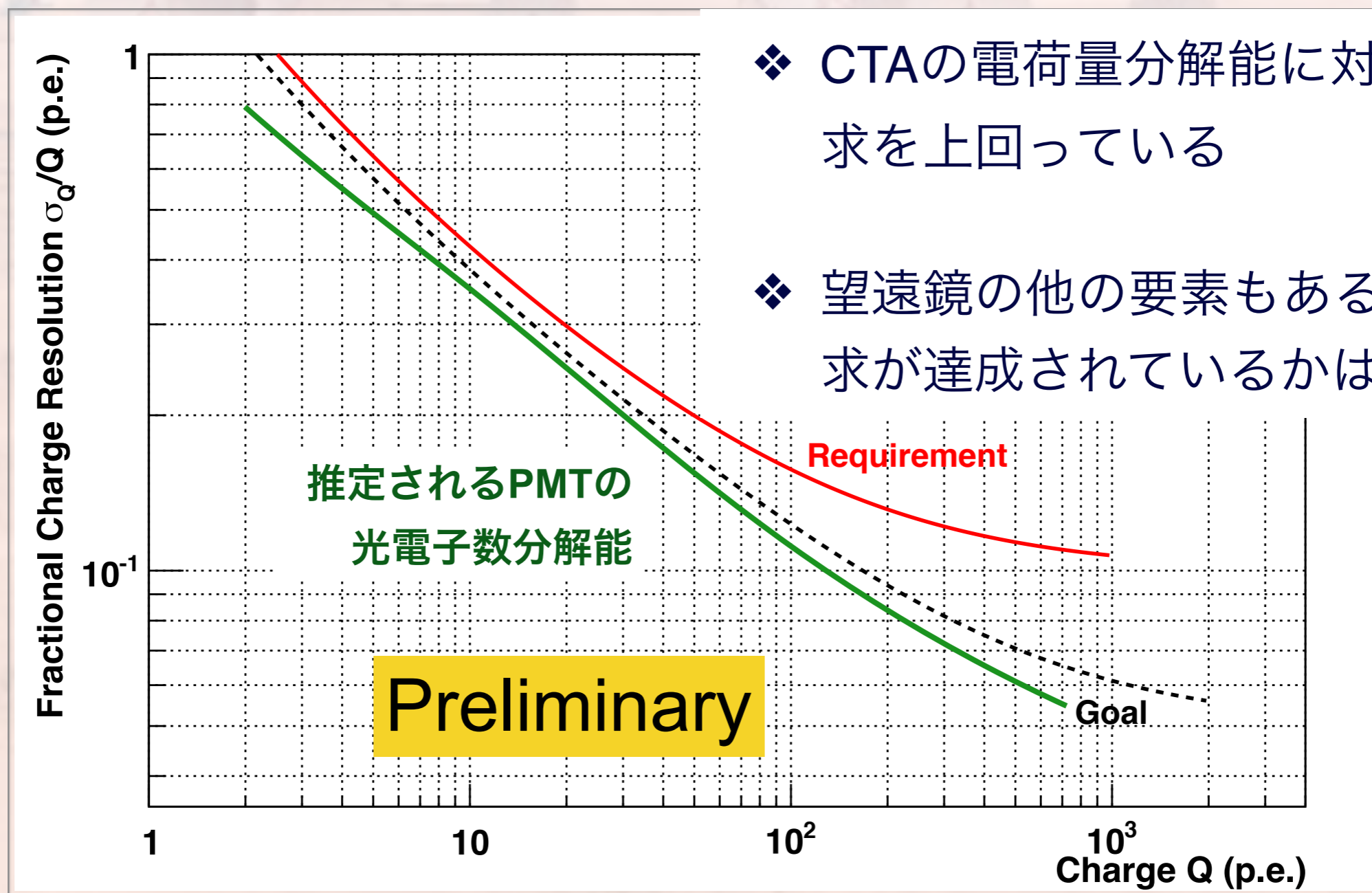
❖ F^2



考察

- ❖ 現在のところ F^2 は 1.21 - 1.28 に分布。仮に $F^2 = 1.25$ とおく
- ❖ 他の方法による結果も考えて誤差を $\Delta F^2 \approx 0.05$ (4%) とすると、
- ❖ 光電子数決定精度は $(\Delta Q/Q)^2 = (\Delta F^2/F^2)^2 + F^2/Q$
- ❖ $\Delta Q/Q \approx 79\%$ @2光電子
- ❖ $\Delta Q/Q \approx 5\%$ @1000光電子

CATの分解能への要求との比較



- ❖ CTAの電荷量分解能に対する要求を上回っている
- ❖ 望遠鏡の他の要素もあるので要求が達成されているかは未確認

今後の課題

- ❖ 大光量での測定結果と今回の方法による結果が consistentかどうか確認する
- ❖ ゲインとFファクターの誤差を正しく見積もり、不定性を検証する

Summary

- ❖ ゲインとFファクターを予め正確に測定しておく事が低エネルギー閾値、高エネルギー分解能実現のために重要
- ❖ 準弾性散乱成分の存在と複数光電子イベントの混入が測定を難しくしている
 - » 極めて低強度の光による測定は正確な結果を与えるが時間がかかる
- ❖ 有望な手法
 - » ポアソン分布を仮定した複数光電子成分の推定
 - » Consistentなパラメーター λ を求めた上でのペDESTアルの差し引き