

# モデル非依存な 光電子増倍管出力 応答分布の解析法

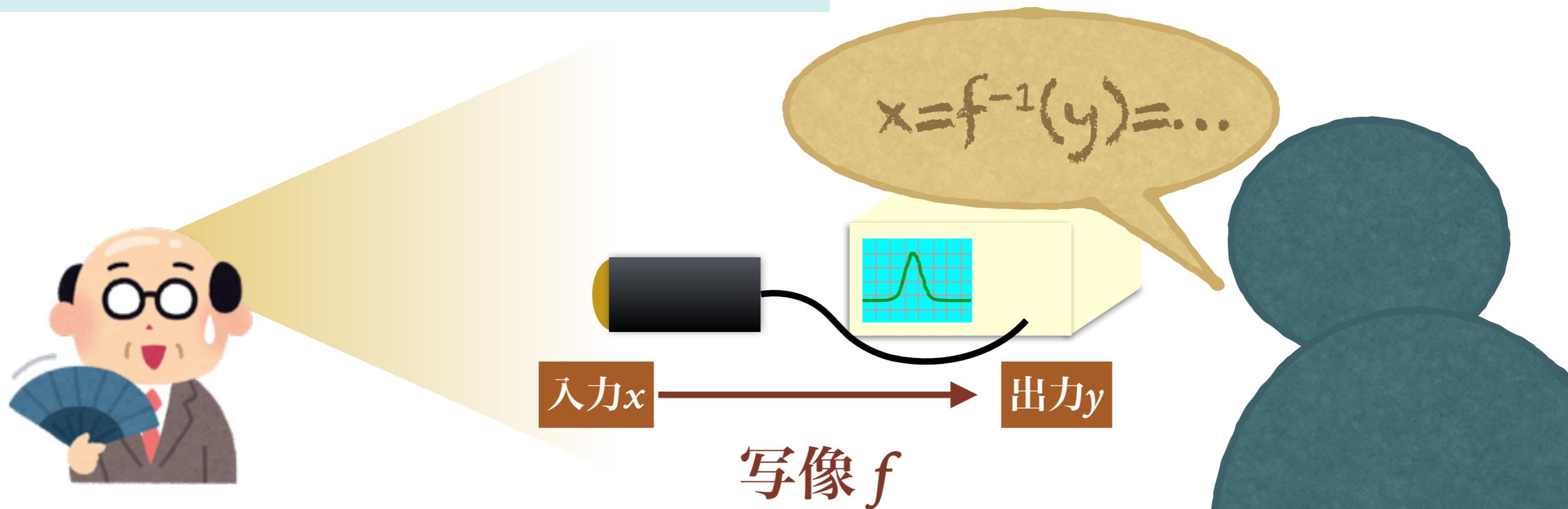
---

東京大学宇宙線研究所  
チェレンコフ宇宙  
ガンマ線グループ  
高橋 光成

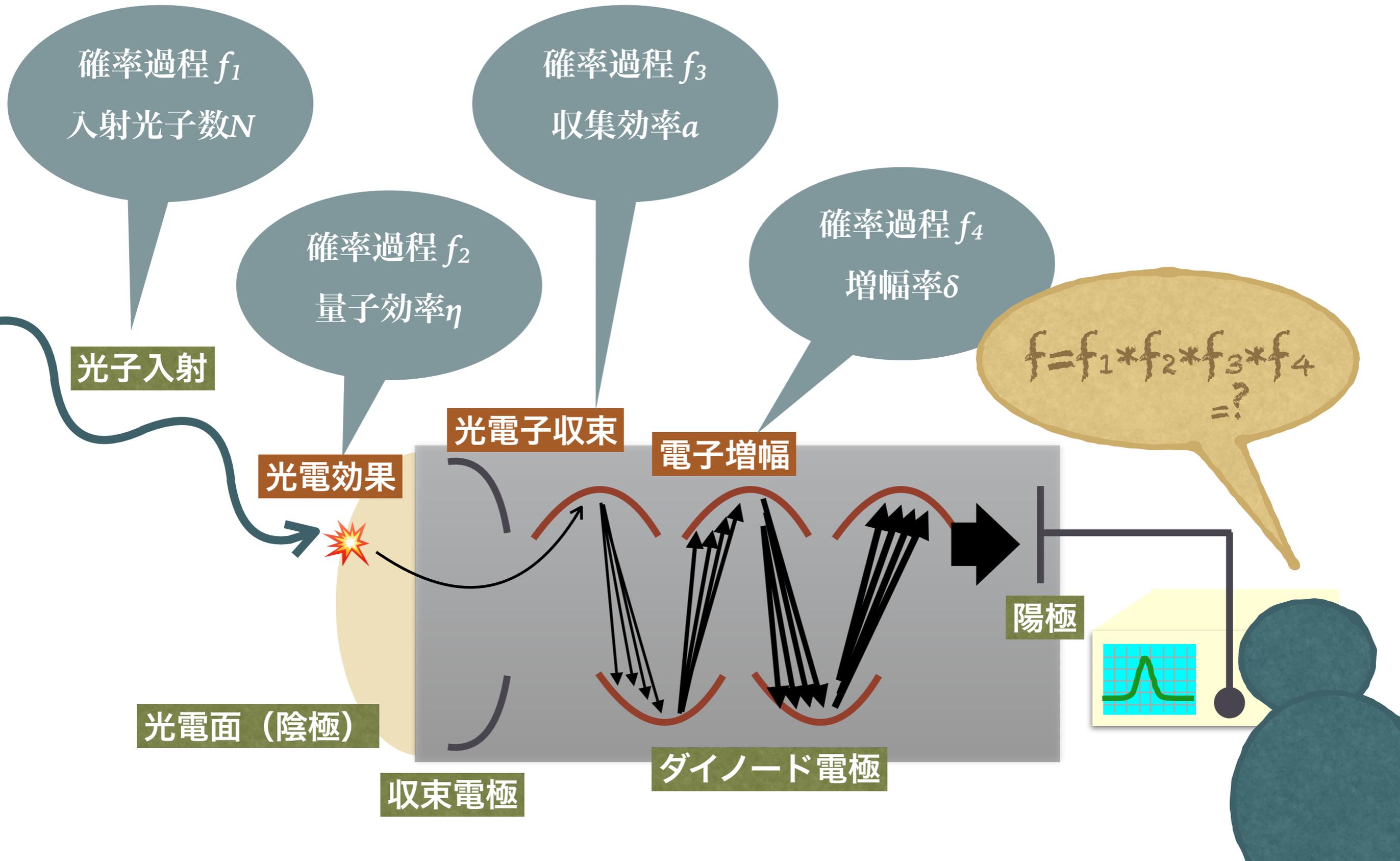
# 光検出器のはたらき

## 理想的光検出器の場合

- ▶ 光子数空間から電荷量空間／電圧空間に一对一写像して出力する関数としてはたらく

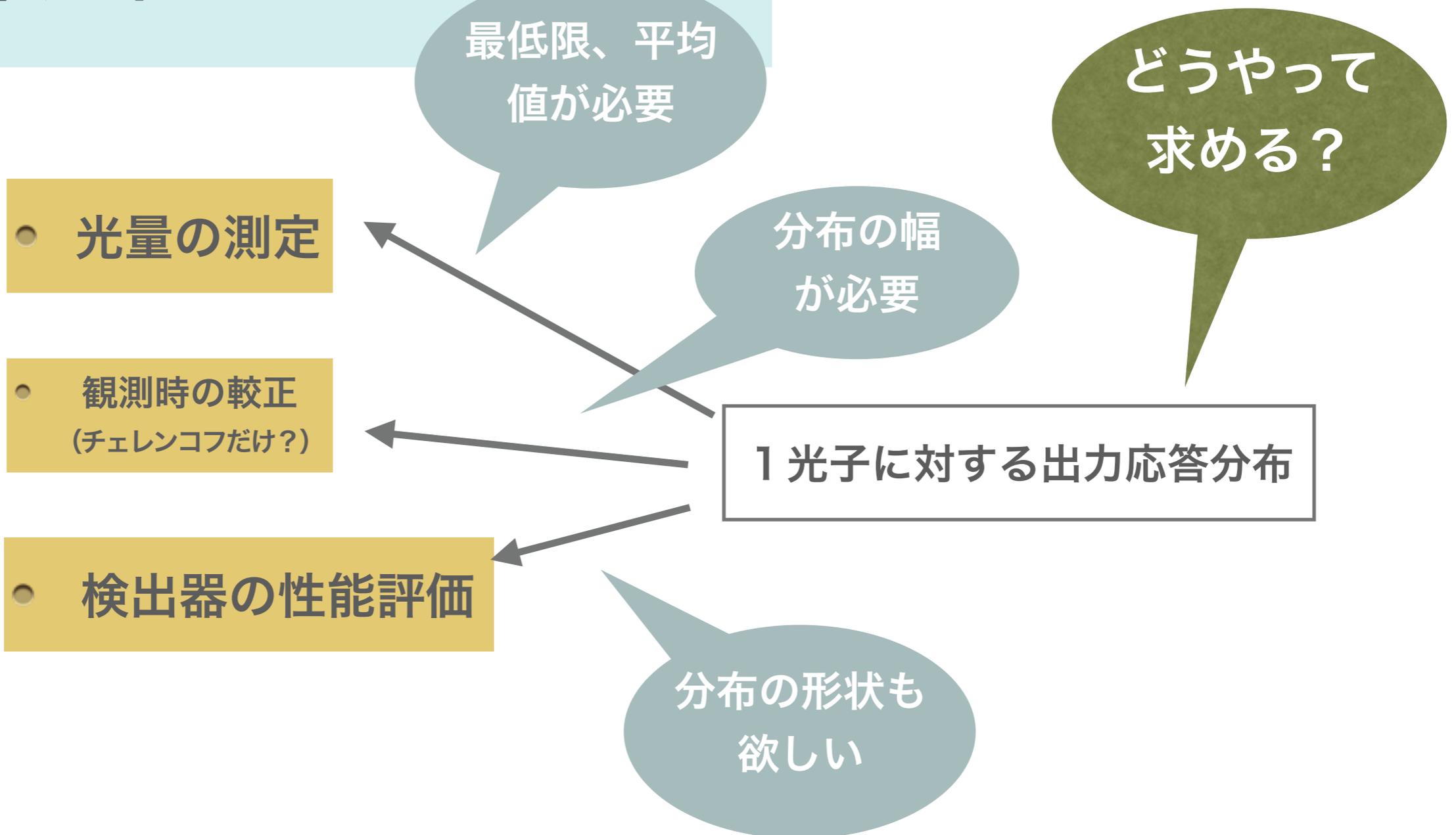


# 実際の光電子増倍管の出力



# 求める分布

▶ある入力 $x$ に対する出力応答 $y$   
は確率分布となる

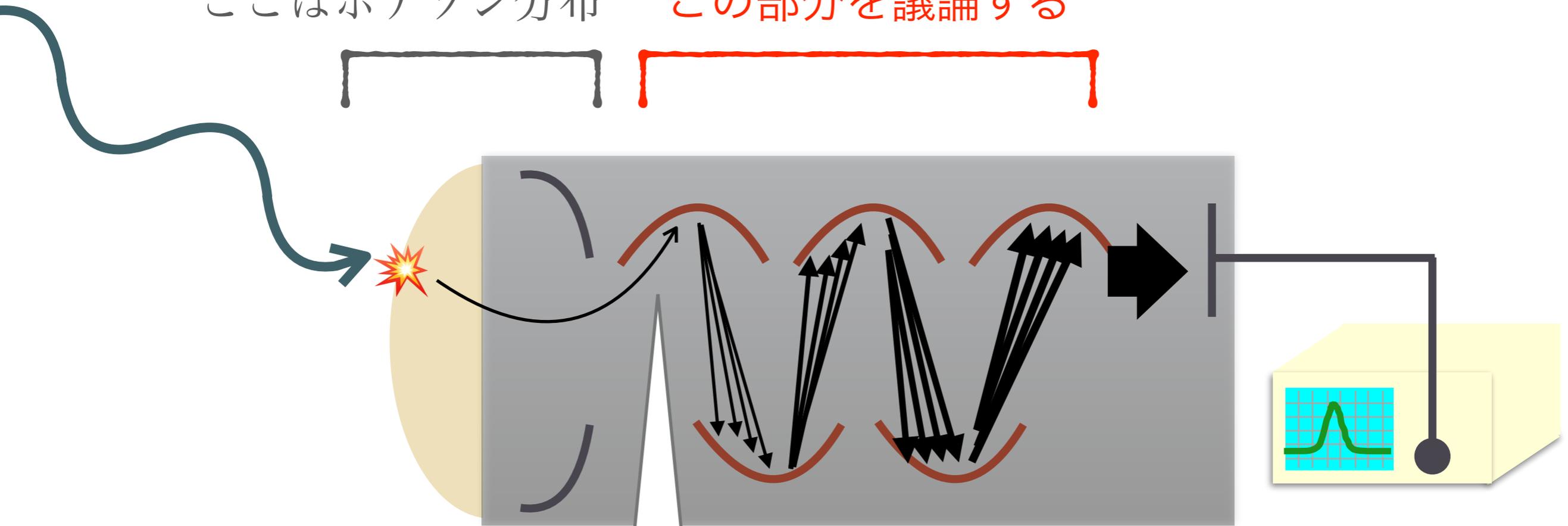


# 本講演で扱う部分

---

ここはポアソン分布

この部分を議論する



**最重要：第1ダイノードでの2次電子放出数の揺らぎ**  
電子数が少ないため統計的揺らぎが最終的な増幅率に大きく影響する

# ここまでのまとめ

---

## 理想的光検出器

- ▶ ある光子数に対して一意的な電荷量や電圧を出力する関数

## 実際の光電子増倍管

- ▶ 出力応答は確率分布となる
- ▶ 第1ダイノードの増幅率揺らぎが支配的

## 検出器の性能評価

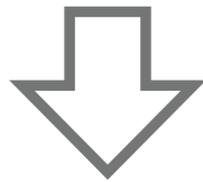
- ▶ 1光電子に対する出力応答分布を求める必要

# 解析法

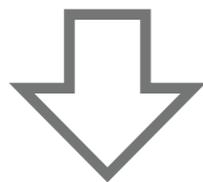
---

# 1光電子応答分布の求め方

▶1光電子(phe)/イベント以下の低光量で測定

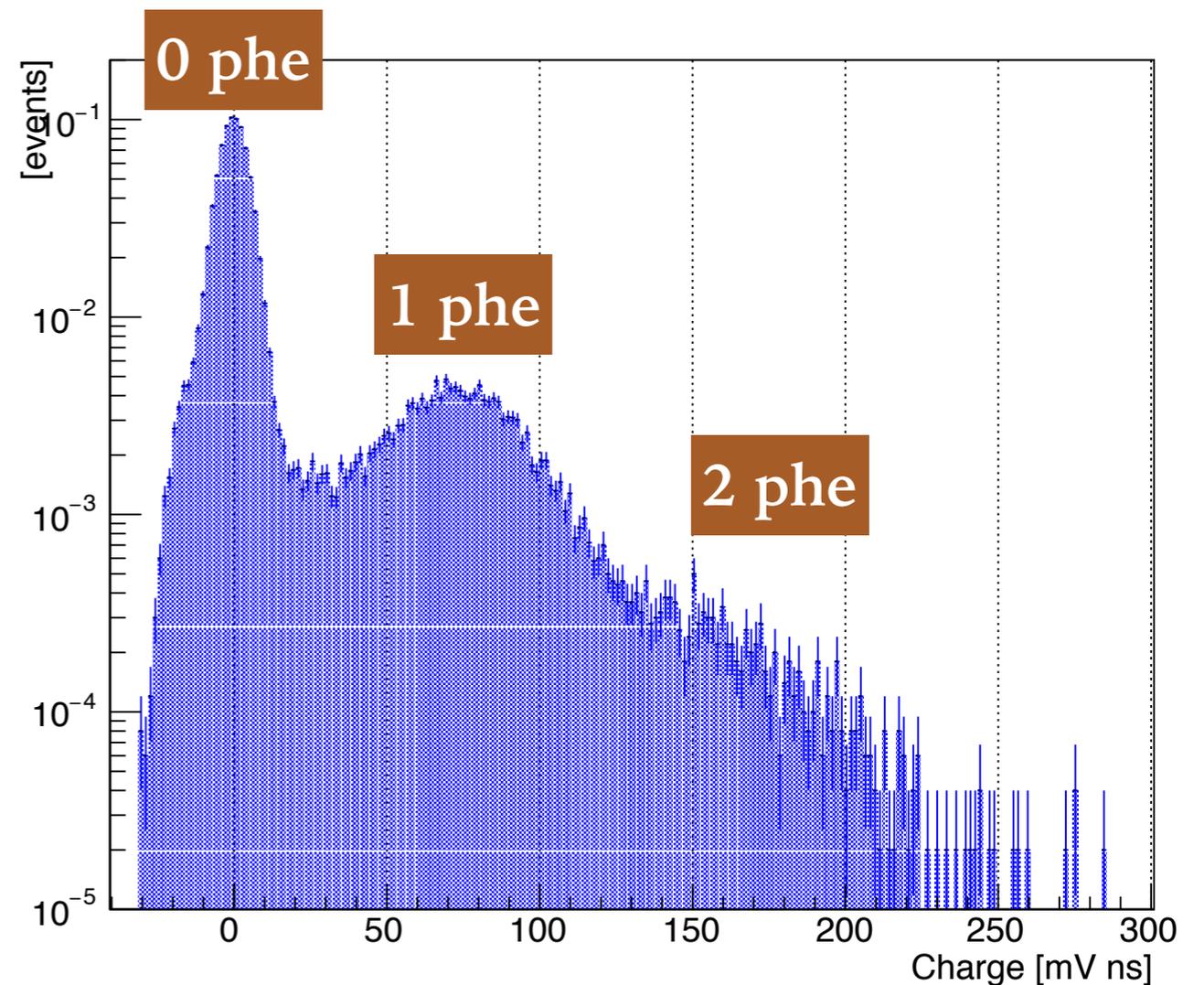


▶0 phe, 1 phe, 2 phe, ...  
のピークが現れる



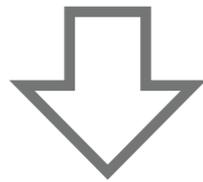
▶ここから 1 phe 分布  
を取り出す

出力電荷量のヒストグラム

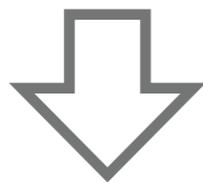


# 1光電子応答分布の求め方

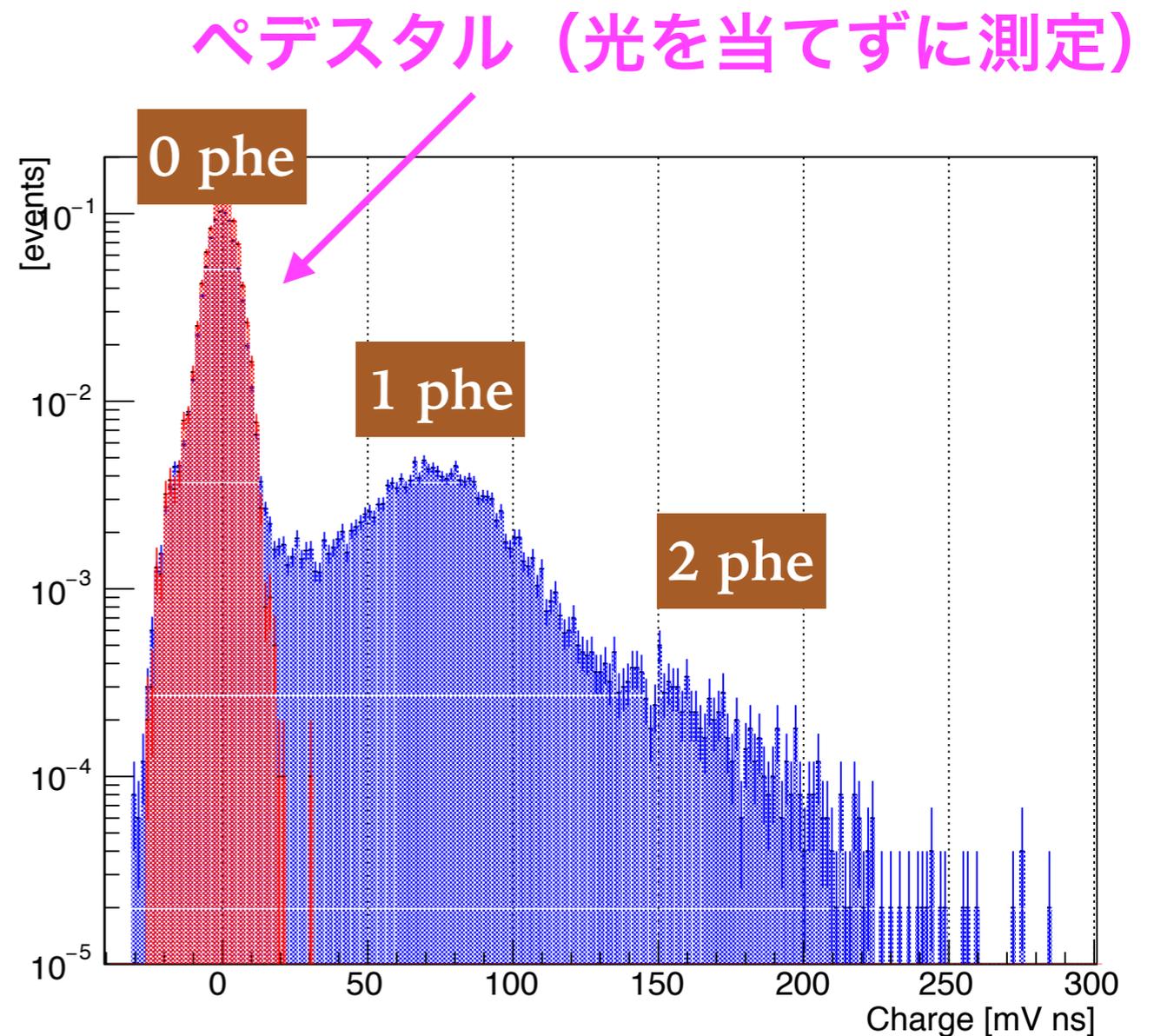
▶ 1光電子(phe)/イベント以下の低光量で測定



▶ 0 phe, 1 phe, 2 phe, ...  
のピークが現れる



▶ ここから 1 phe 分布  
を取り出す



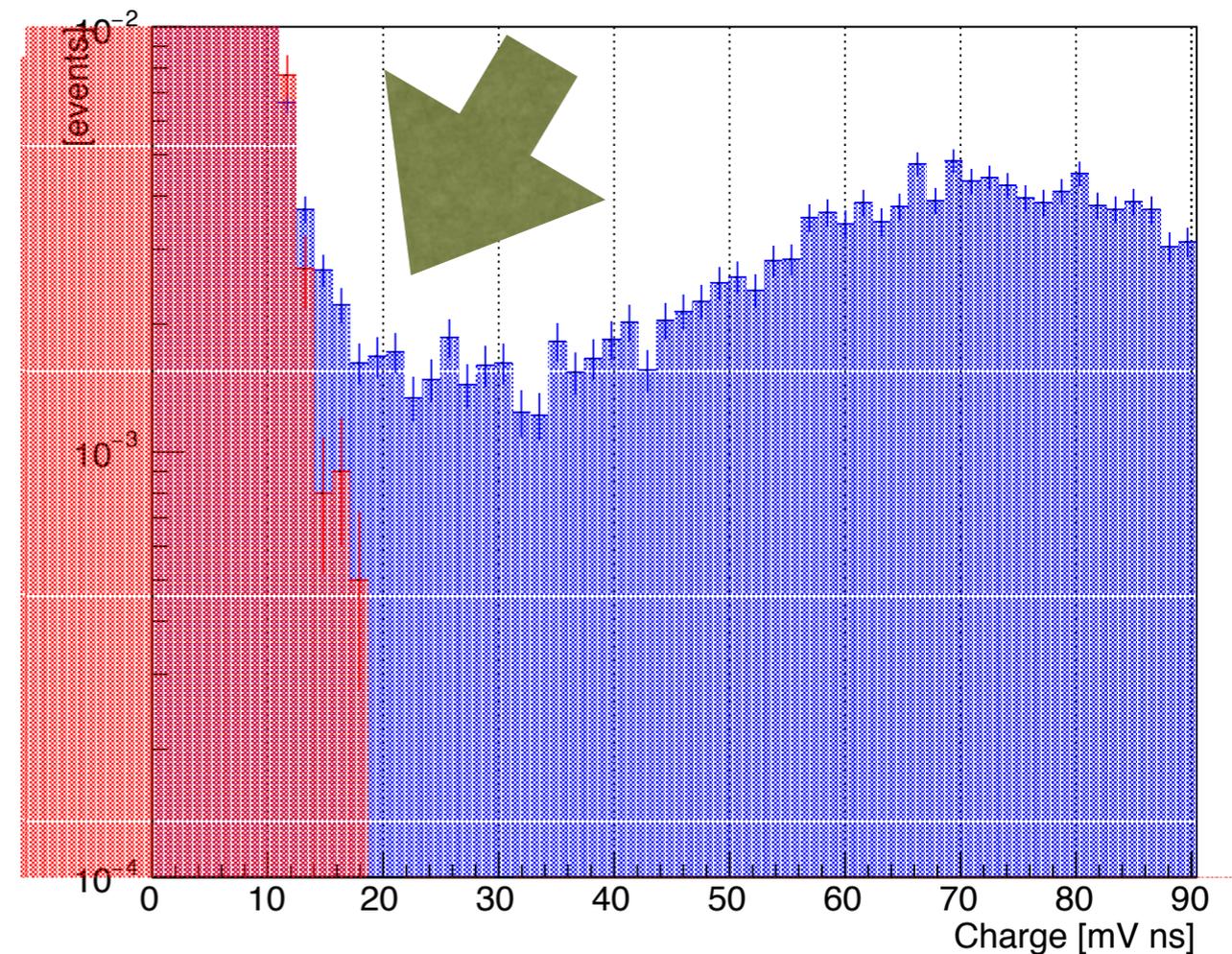
# 準弾性散乱成分

▶ 0付近にガウス分布に従わない成分が存在

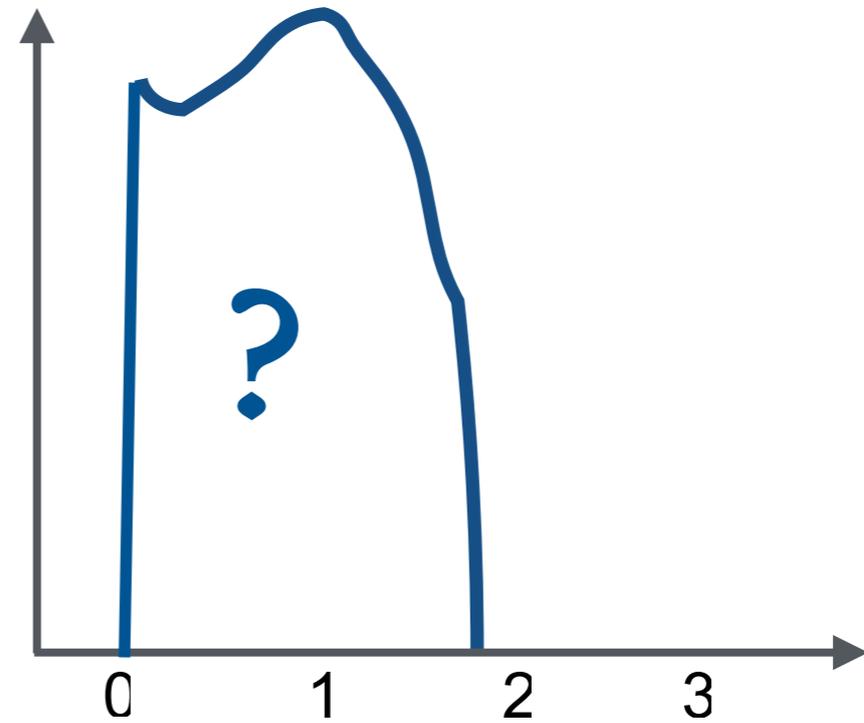
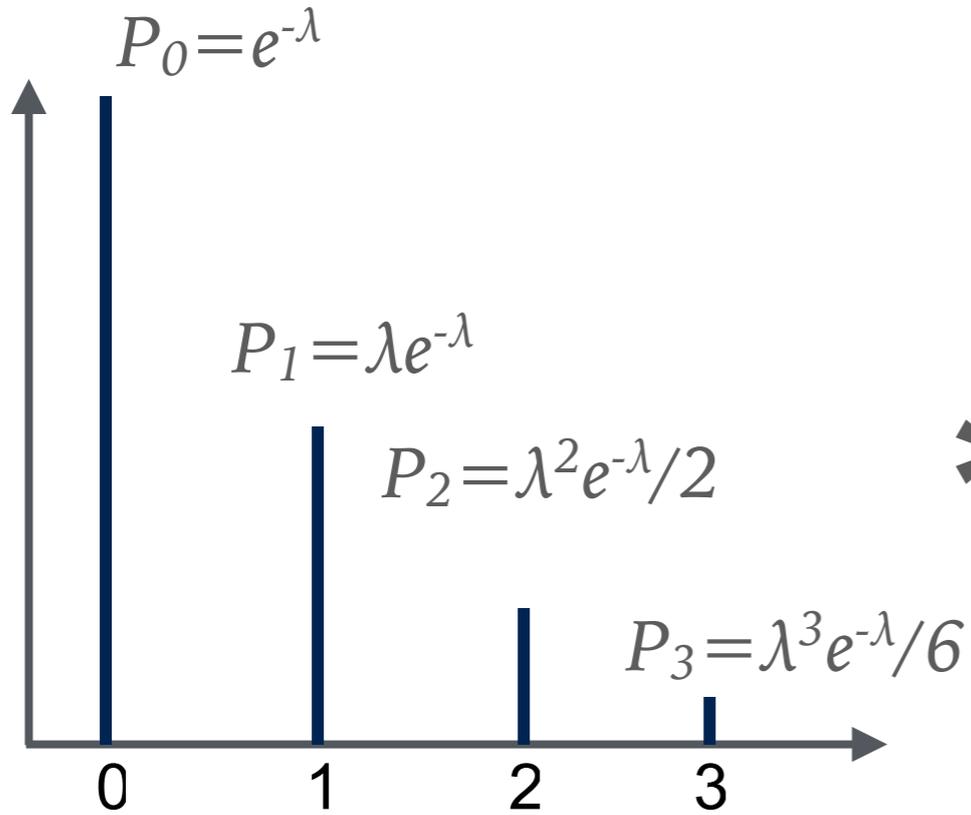
- ▶ 光電子が第1ダイノードで準弾性的に散乱
- ▶ 落とすエネルギーが小さい

▶ 分布の形状は不確定

フィッティング等  
のモデルに依存する方法は  
避けたい



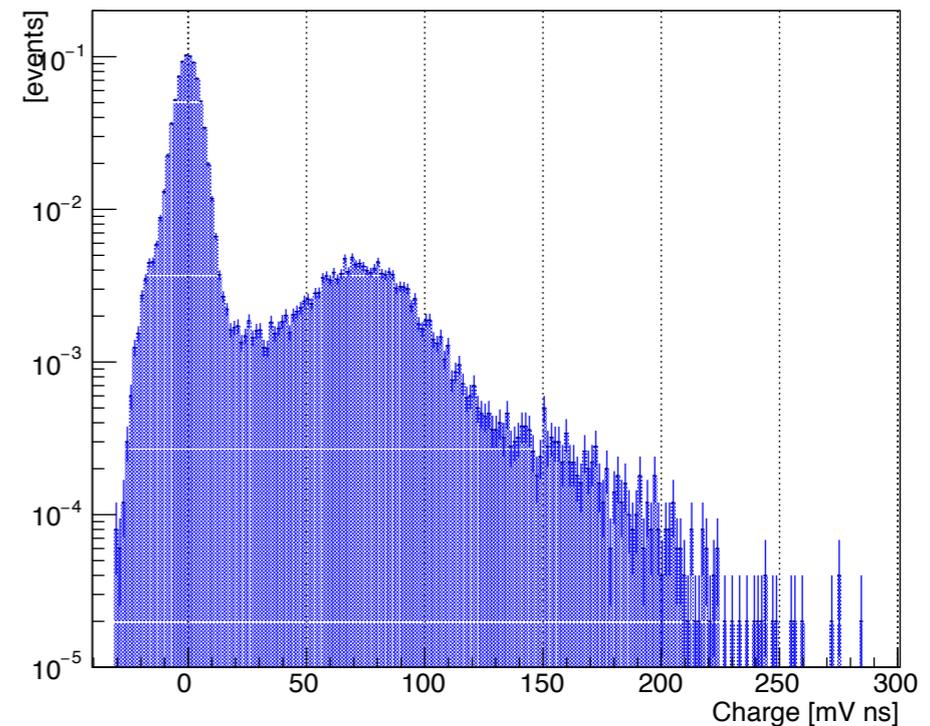
# アイディア



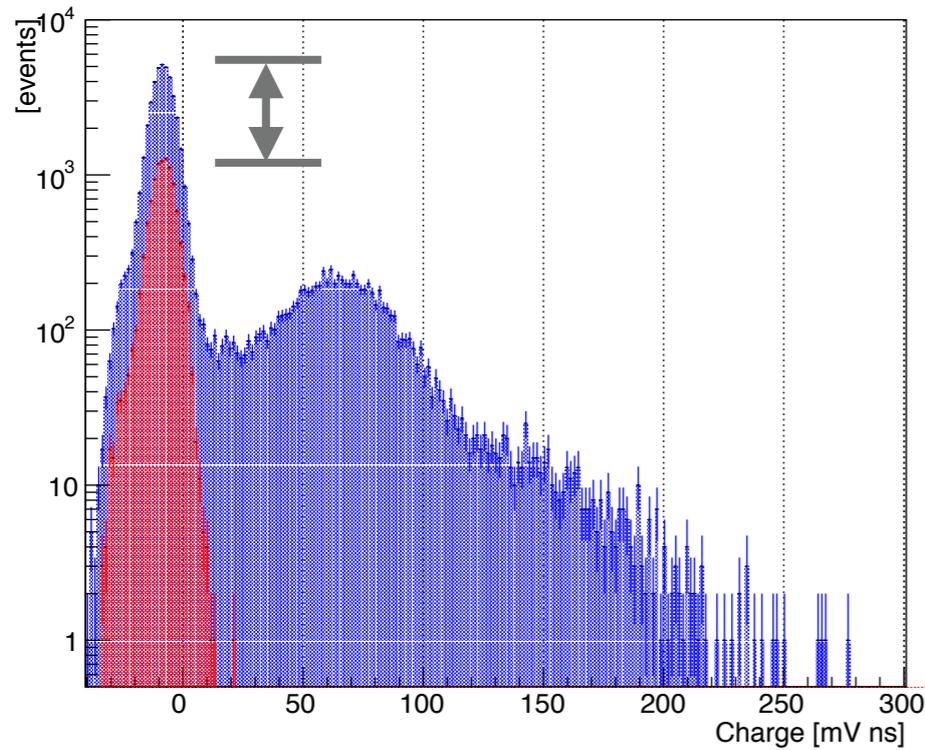
観測される電荷量分布は

- 入射光電子のポアソン分布
- 光電子増倍管の応答分布

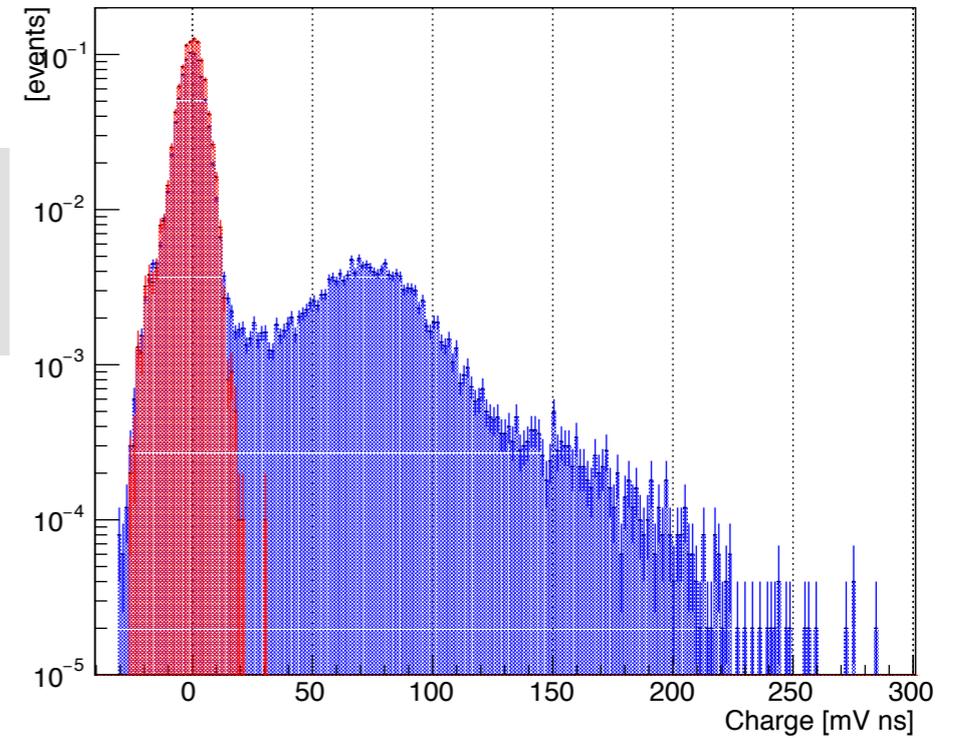
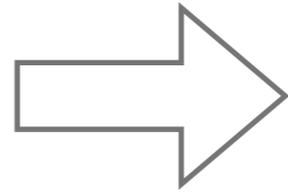
の畳み込みと考えられる



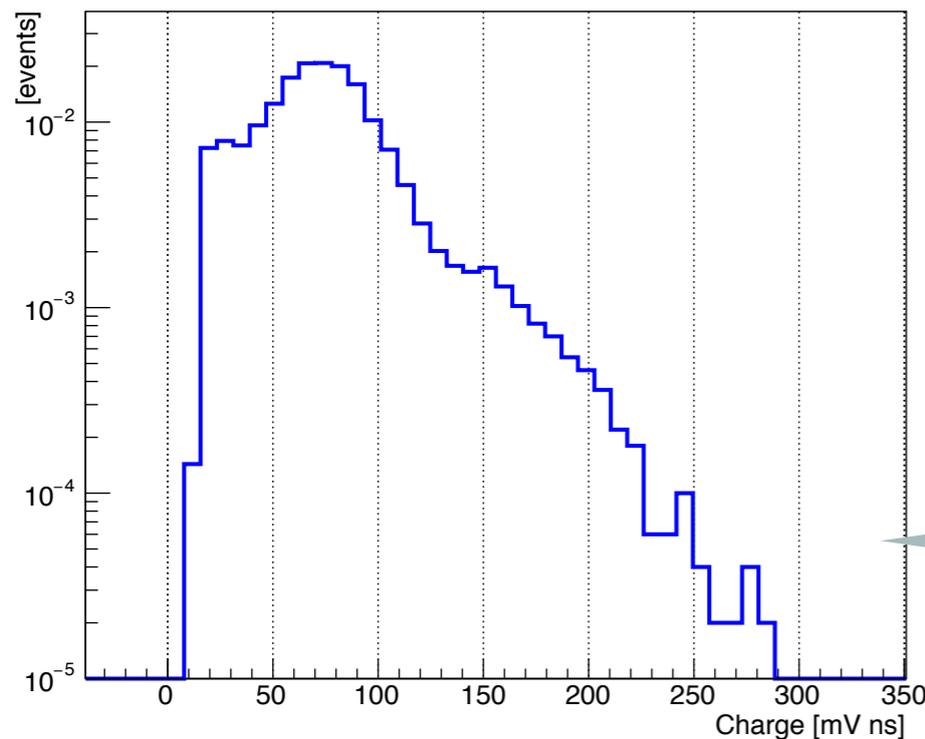
# Step1 ゼロ光電子成分を落とす



ペDESTラルを  
縦にスケール



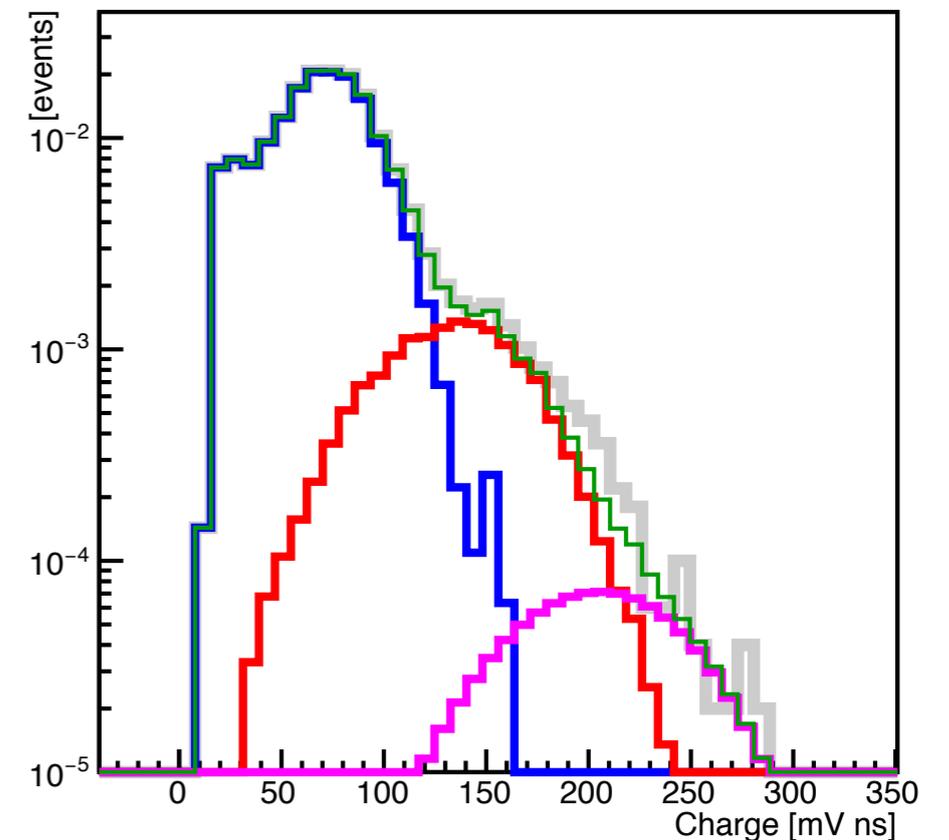
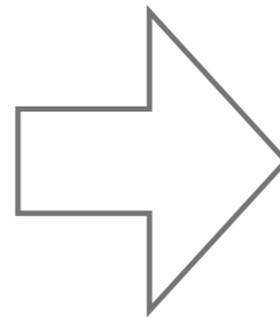
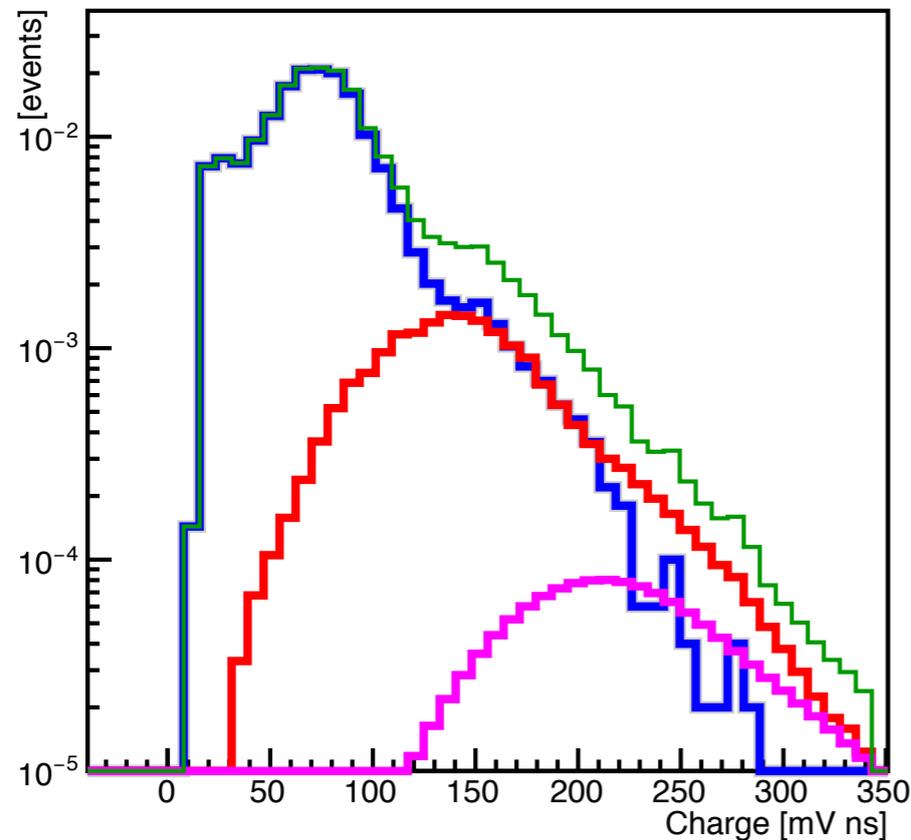
ペDESTラルを  
差し引く



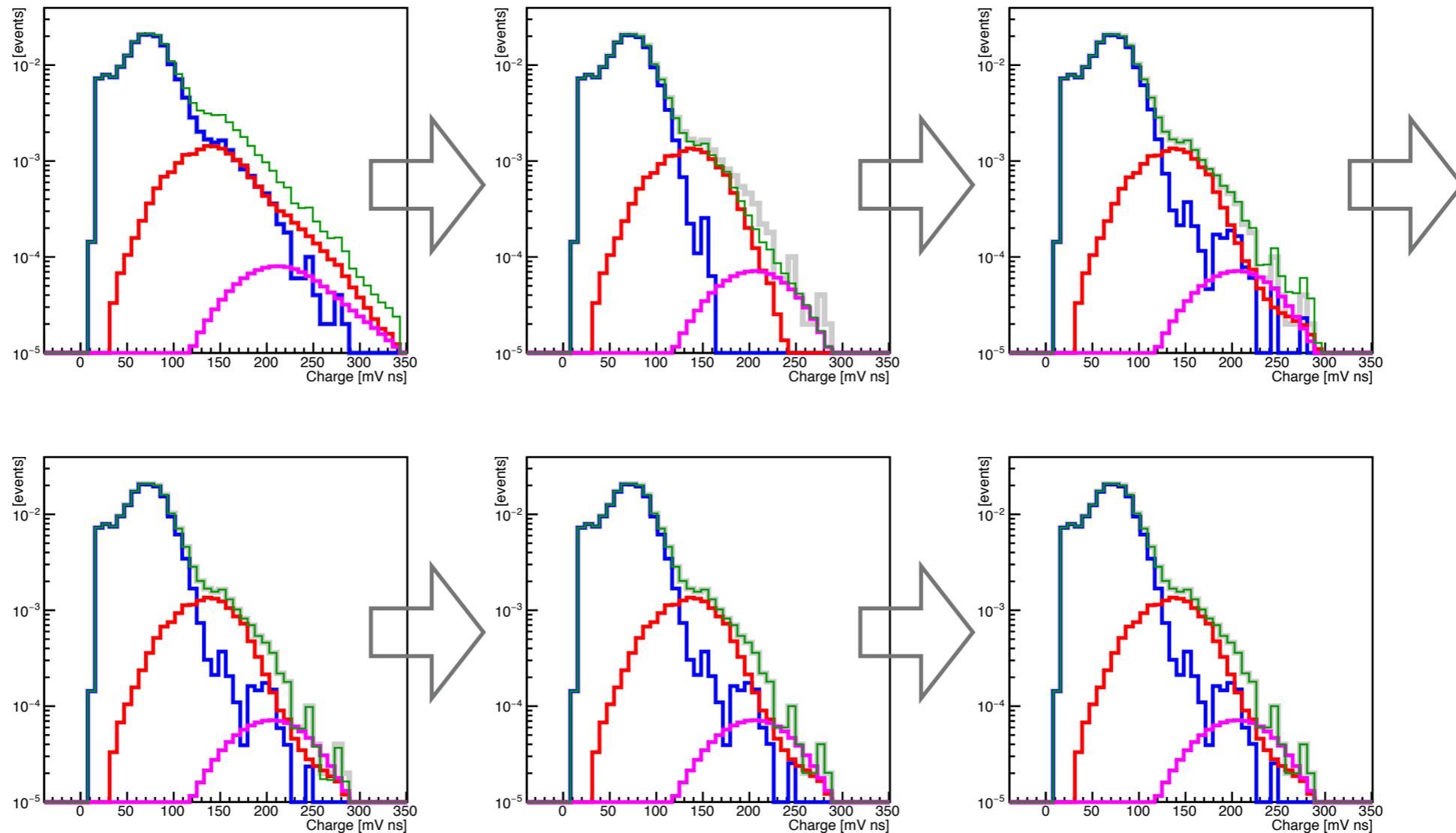
まずこれを 1 phe分布と仮定し  
て2, 3 phe分布を推定

# Step2 複数光電子成分を落とす

- 入力光電子数はポアソン分布に従うと仮定
- ポアソンパラメーター $\lambda$ を定めると **1 phe**分布から **2 phe**、**3 phe**分布が計算できる
- 元の分布から **2 phe**、**3 phe**成分を引く
- 残った分布を新しい **1 phe**分布として、**2 phe**、**3 phe**分布を計算

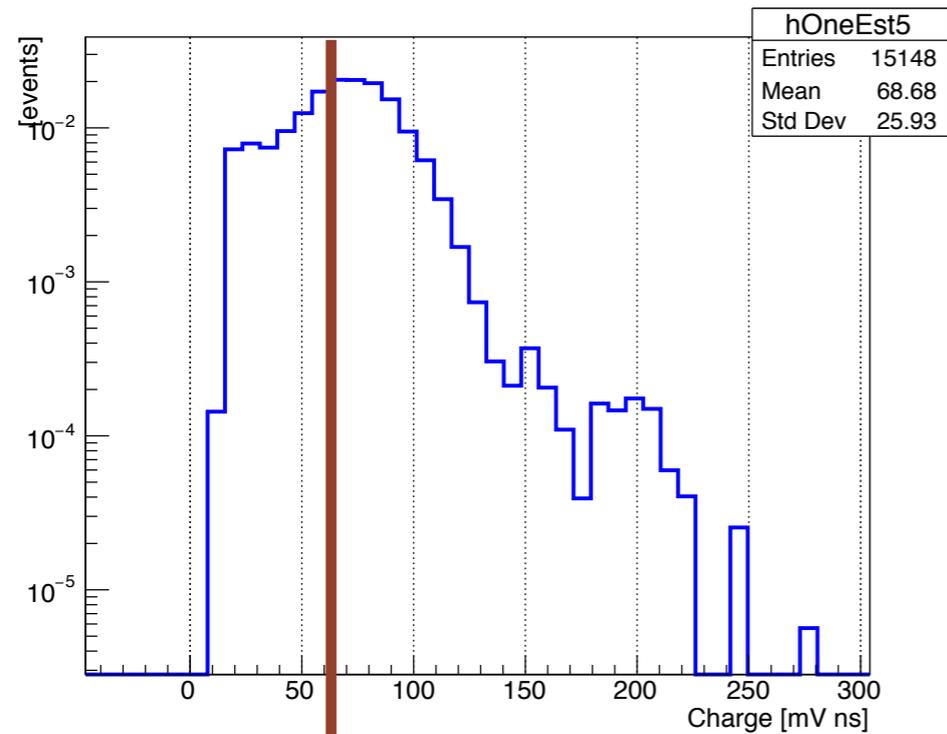


# Step2 複数光電子成分を落とす

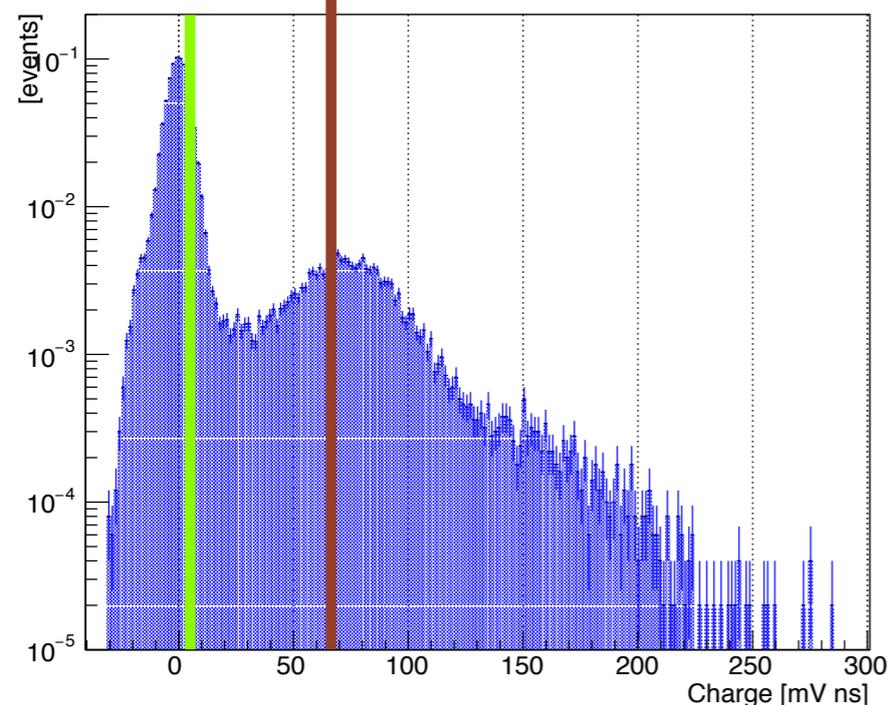


▶ 繰り返すと**1,2,3phe成分の和**が元の分布に収束する

# Step3 ペDESTALを引直す



$m$   $m_1$



▶ 得られた分布の平均 $m_1$ が  
光電子増倍管のゲインとなる

▶ 測定電荷量の平均 $m$ と合わせて  
 $\lambda = m/m_1$   
により(1イベント中の平均phe数) =  
(ポアソンパラメーター)が得られる

▶ 0 pheイベントの割合は $e^{-\lambda}$

▶ この値を使ってペDESTALのスケーリ  
ングをやり直し、以下の解析を繰り返  
す

▶ 前後の $\lambda$ が収束するまで繰り返す

# ここまでのまとめ

λを推定

1 phe分布を推定

2、3 phe分布を推定

1 phe分布を推定

2、3 phe分布を推定

1 phe分布を推定

繰り返す

λを推定

1 phe分布を推定

2、3 phe分布を推定

1 phe分布を推定

2、3 phe分布を推定

1 phe分布を推定

繰り返す

λを推定

1 phe分布を推定

2、3 phe分布を推定

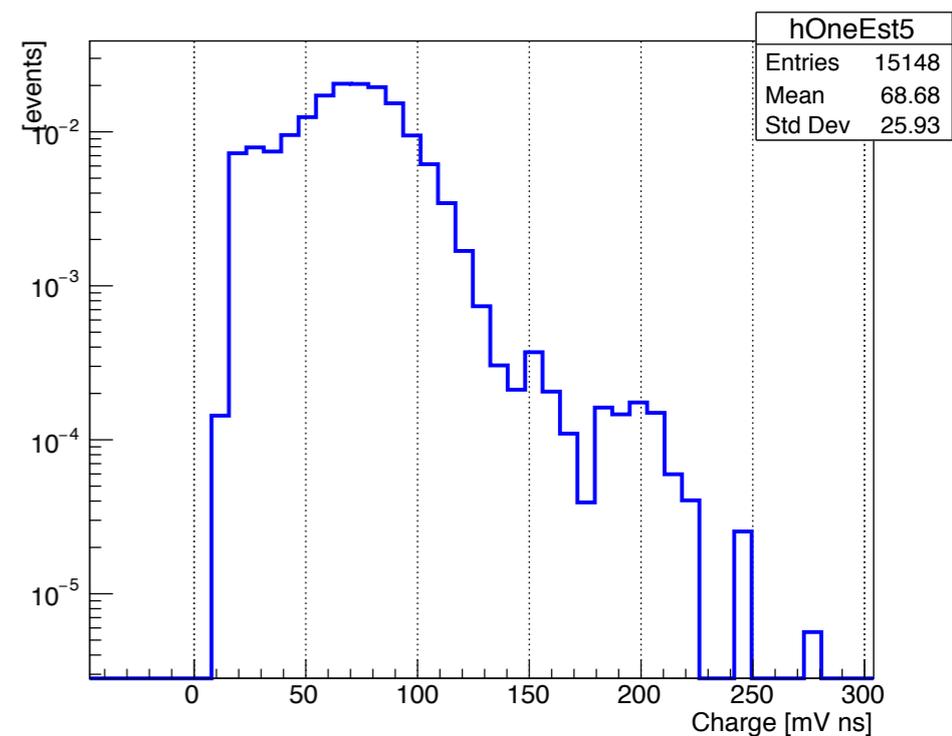
1 phe分布を推定

2、3 phe分布を推定

1 phe分布を推定

繰り返す

繰り返す



# Toy Monte Carlo による解析法由来の 誤差見積もり

---

# 1 光電子応答分布の求め方

---

▶ 新しい解析法のため、  
これ自体に由来する  
系統誤差を確認したい

● 真の 1 phe分布を仮定



● Monte Carloにより測定データを模擬



● 実際の測定データ同様に解析



● 解析結果と仮定した真の分布を比較

# 1光電子応答分布の求め方

▶ 新しい解析法のため、  
これ自体に由来する  
系統誤差を確認したい

● 真の 1 phe分布を仮定



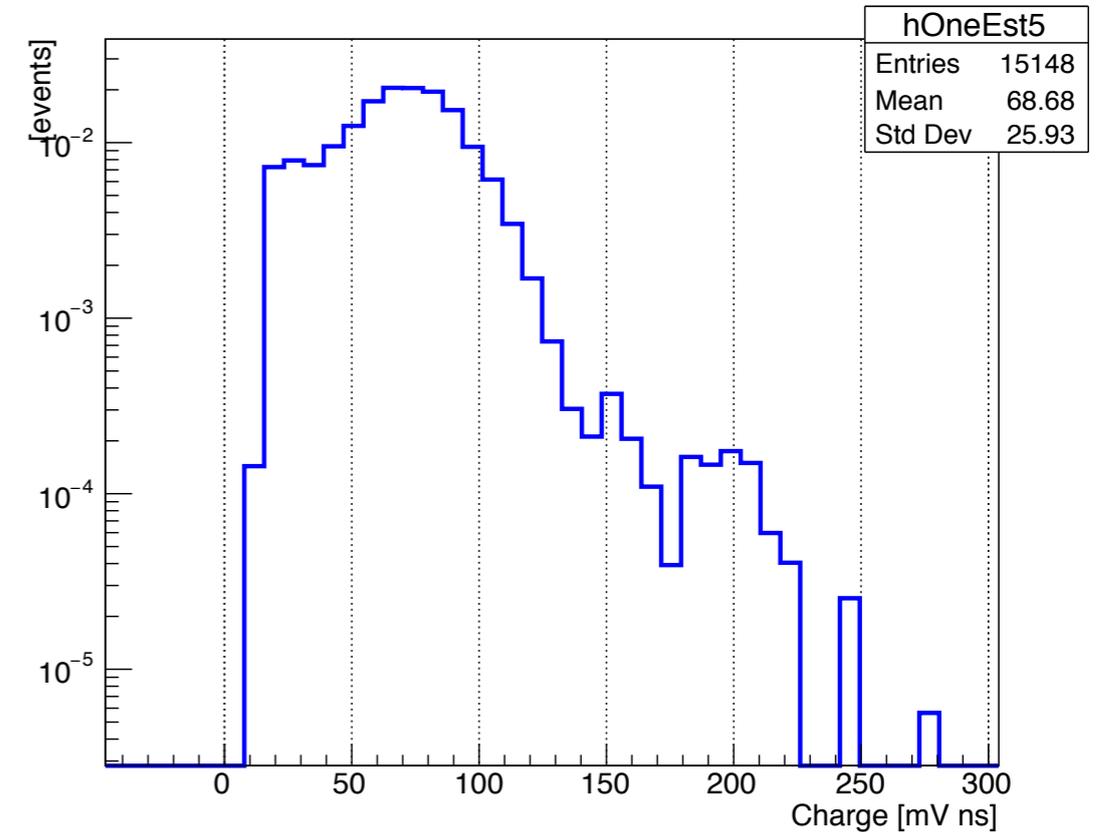
● Monte Carloにより測定データを模擬



● 実際の測定データ同様に解析



● 解析結果と仮定した真の分布を比較



ここでは簡単に解析で求められた  
分布をそのまま真の分布と仮定する

# 1光電子応答分布の求め方

▶ 新しい解析法のため、  
これ自体に由来する  
系統誤差を確認したい

● 真の 1 phe分布を仮定



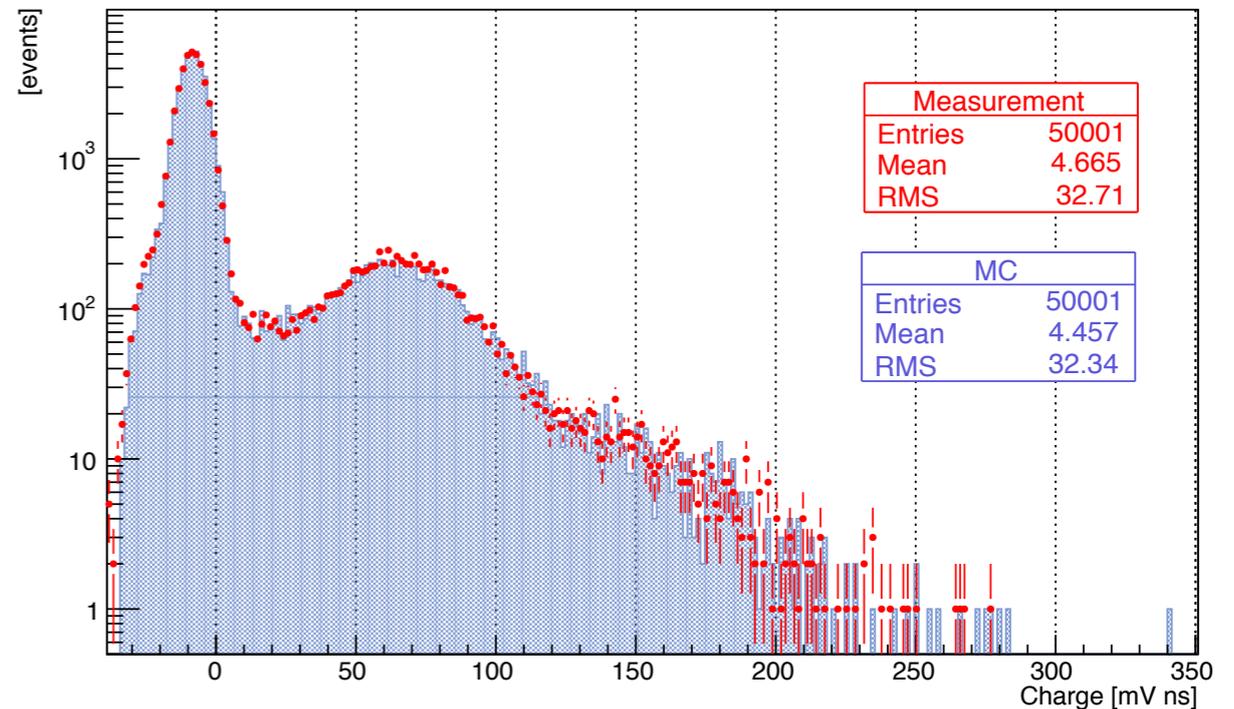
● Monte Carloにより測定データを模擬



● 実際の測定データ同様に解析



● 解析結果と仮定した真の分布を比較



# 1光電子応答分布の求め方

▶ 新しい解析法のため、  
これ自体に由来する  
系統誤差を確認したい

● 真の 1 phe分布を仮定



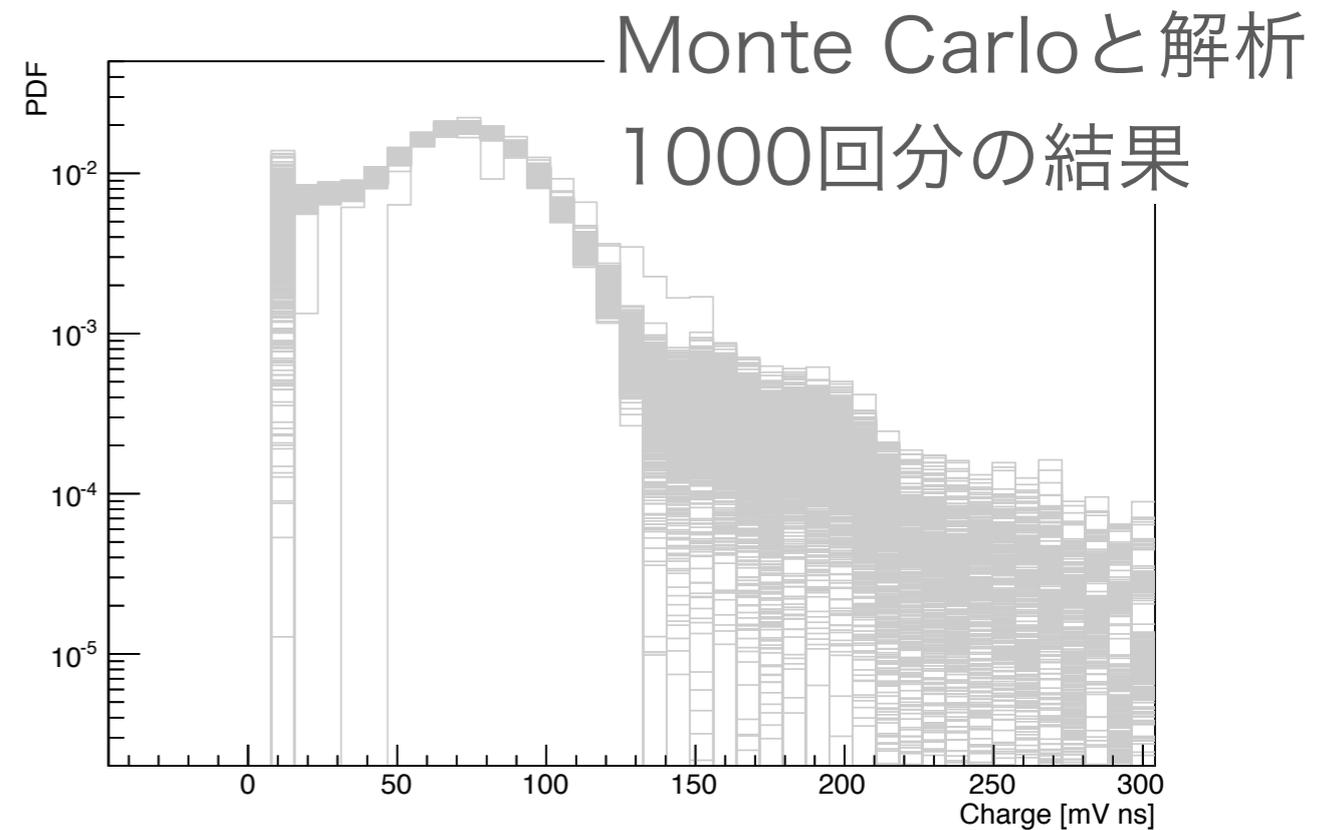
● Monte Carloにより測定データを模擬



● 実際の測定データ同様に解析



● 解析結果と仮定した真の分布を比較



# 1光電子応答分布の求め方

▶ 新しい解析法のため、  
これ自体に由来する  
系統誤差を確認したい

● 真の 1 phe分布を仮定



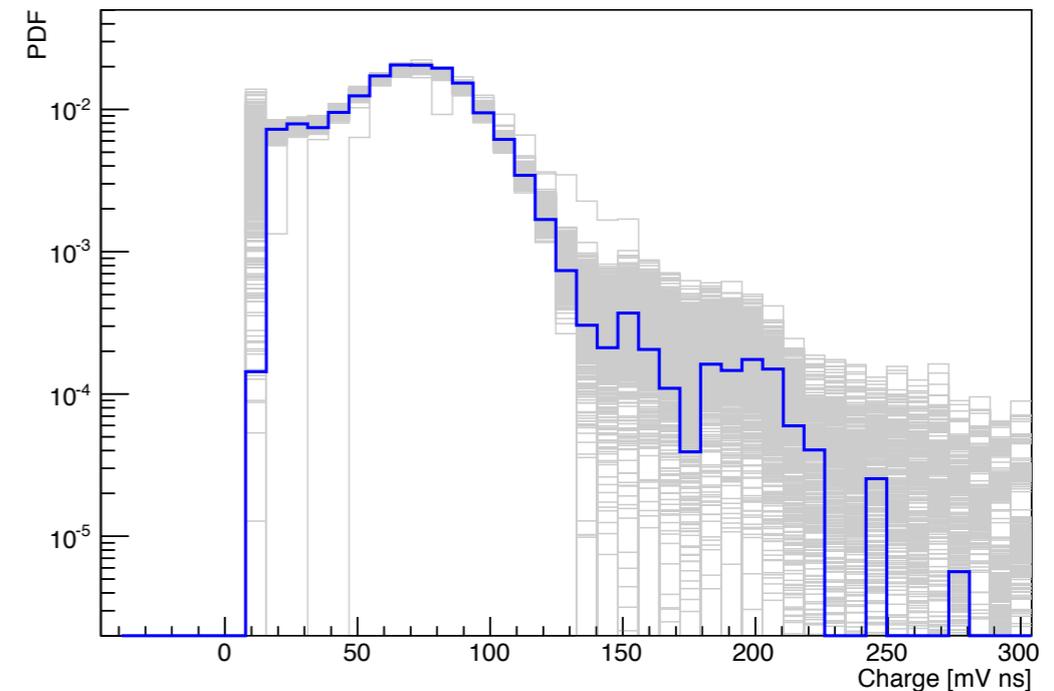
● Monte Carloにより測定データを模擬



● 実際の測定データ同様に解析



● 解析結果と仮定した真の分布を比較



# 1光電子応答分布の求め方

▶ 新しい解析法のため、  
これ自体に由来する  
系統誤差を確認したい

● 真の 1 phe分布を仮定



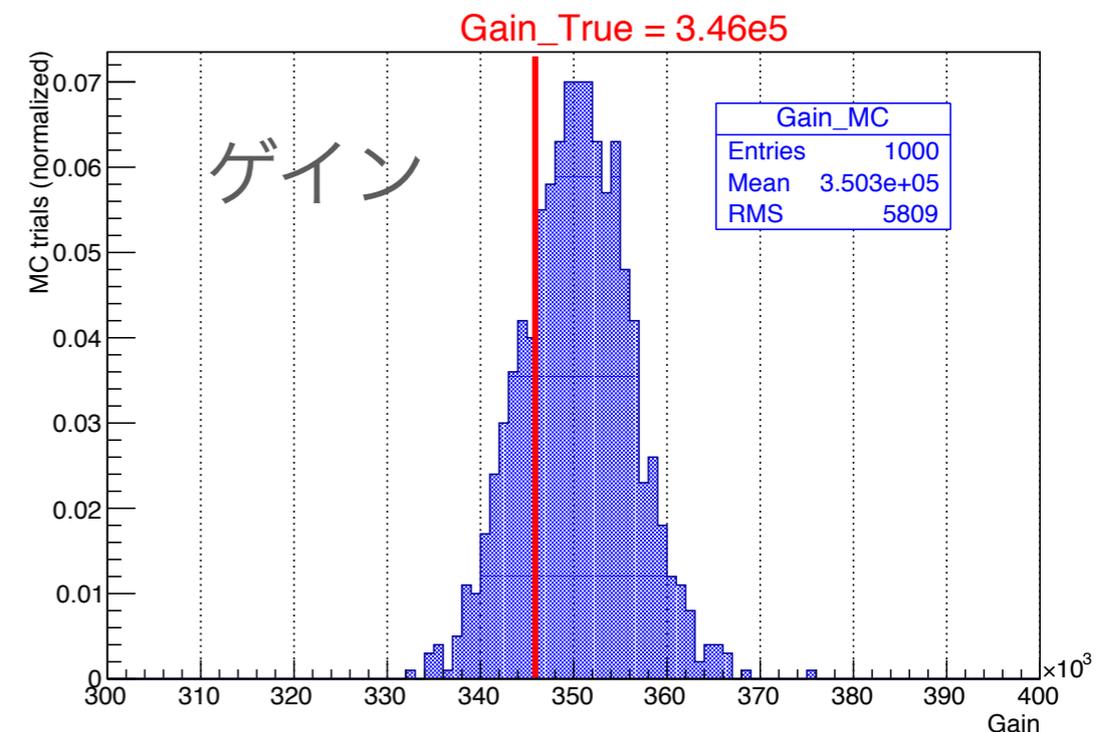
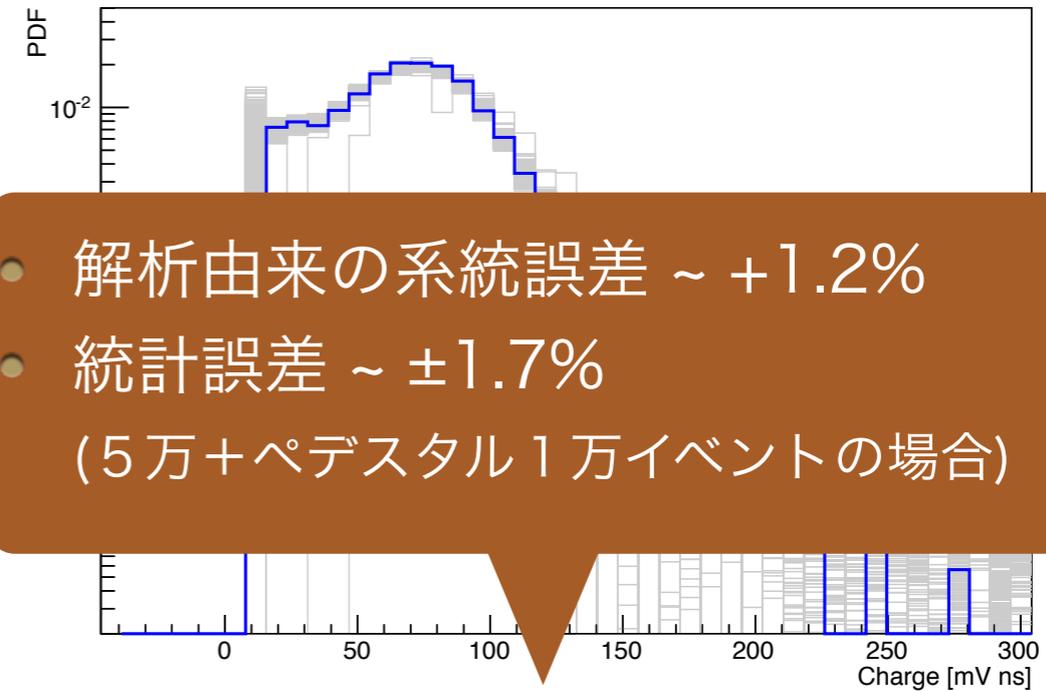
● Monte Carloにより測定データを模擬



● 実際の測定データ同様に解析



● 解析結果と仮定した真の分布を比較

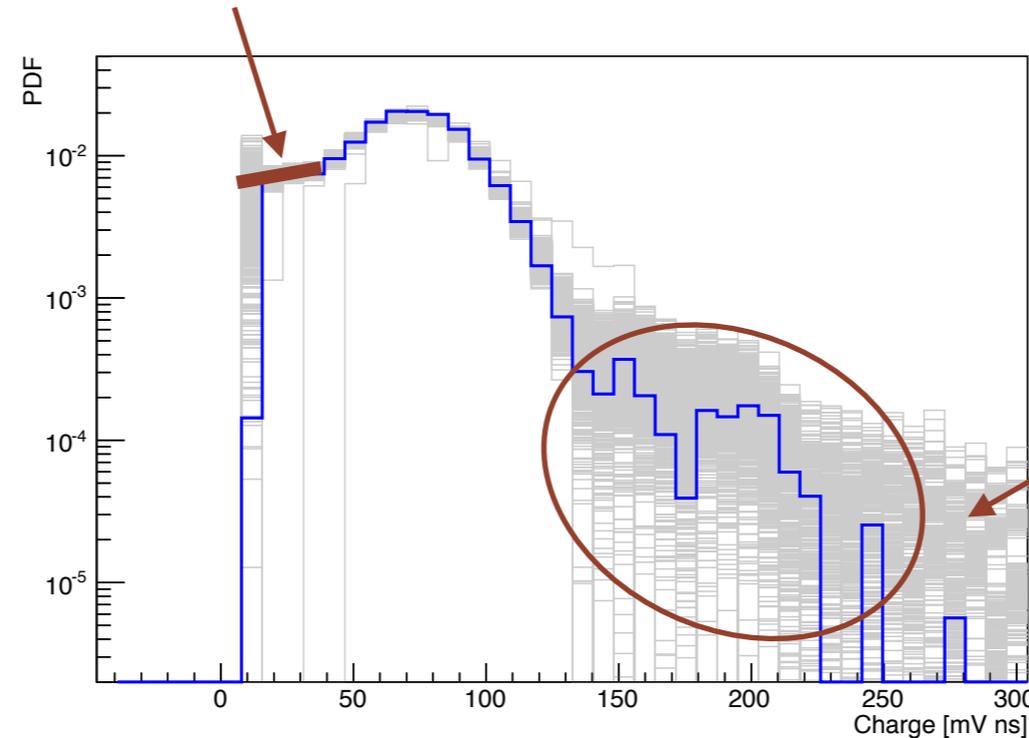


# 今後やりたい誰かにやってほしいこと

## ▶ 仮定する真の分布を色々変えて解析法による影響を調べる

カットオフがあるかどうか

0まで外挿した分布を仮定して試す



Excessがリアルどうか

この部分をガウシアンに  
替えて試す

## ▶ 測定イベント数の最適化

# まとめ

---

## 光電子増倍管の応答出力

- ▶ 確率分布になる
- ▶ 正確な検出器の性能評価のために求めておきたい

## Toy Monte Carloによる評価

- ▶ 解析法に由来する系統誤差が少なくとも約1%
- ▶ 今後もう少し系統誤差を詰めていきたい

## 特定の関数形を仮定しない解析法

- ▶ 入射光電子数のポアソン分布を仮定し1phe分布からの複数phe分布を推定
- ▶ 1phe分布にフィードバックし、収束するまで繰り返す
- ▶ 求めた1phe分布をポアソンパラメーターにフィードバックし、self-consistentになるよう繰り返す