

CTA 報告111: CTA大口径望遠鏡の性能 向上に向けた7段光電子増倍管の評価結果

高橋光成^A、永吉勤^B、石尾一馬^{A、C}、猪目祐介^D、大岡秀行^A、奥村暁^E、折戸玲子^F、片桐秀明^G、
岸田柁^D、窪秀利^H、櫛田淳子^I、郡司修一^J、小山志勇^K、今野裕介^H、齋藤隆之^H、武田淳希^J、
田中真伸^L、谷川俊介^H、辻本晋平^I、手嶋政廣^{A、C}、寺田幸功^B、友野弥生^I、中嶋大輔^A、中森健之^J、
西嶋恭司^I、野崎誠也^H、林田将明^A、馬場彩^M、増田周^H、山本常夏^D、吉田龍生^G、Dang Viet Tan^G、
Daniela Hadasch^A、Daniel Mazin^{A、C}、他CTA-Japan

東大宇宙線研^A、埼玉大理工^B、Max-Planck-Inst. fuer Phys.^C、甲南大理工^D、名古屋大ISEE^E、
徳島大理工^F、茨城大理^G、京大理^H、東海大理^I、山形大理^J、JAXA宇宙科学研^K、KEK素核研^L、東大理^M、
Open-It^N

講演内容

1. CTA大口径望遠鏡 2 基目以降に向けた新しい光電子増倍管について
2. 光電子増倍管の測定及び解析
 - ▶ 誤差の見積もり
3. 特性評価結果

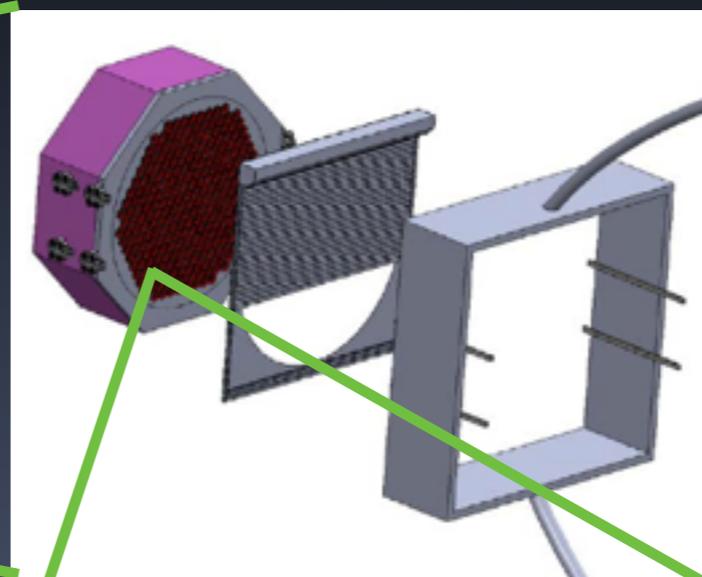
CTA大口径望遠鏡2号機以降に向けた
新しい光電子増倍管について

CTA大口径望遠鏡(LST)用 光電子増倍管(PMT)

焦点面カメラ

PMT 1855本

大口径望遠鏡 (LST)



チェレンコフ光の密度が低くなる低エネルギー側(20-200GeV)を観測するため、より高い感度・S/N・光量分解能の光検出器が求められる

光電子増倍管(PMT) 浜松ホトニクス^{株式会社}(HPK) 製

1号機用 **R11920-100 (8段)**

→ 2号機以降用 **R12992-100 (7段)**

PMT諸特性とそのR12992-100における改善

ダイノードを
8段→7段に

抑制

要求: $4E4$

ゲイン

寿命、ダイナミックレンジに影響

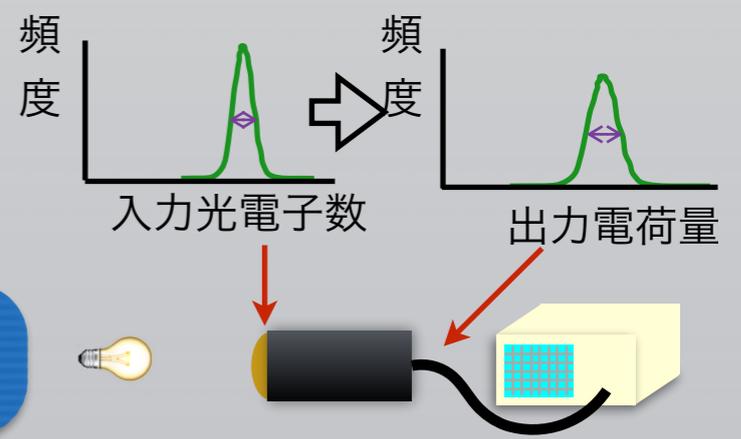
エネルギー分解能に影響

過剰雑音係数F

$$F = \frac{N/S \text{ at the output}}{N/S \text{ at the input}}$$

校正に使用

S/Nに影響



改善

パルス幅

要求: 平均
2.5-3ns

要求: <0.02%

アフターパルス発生確率

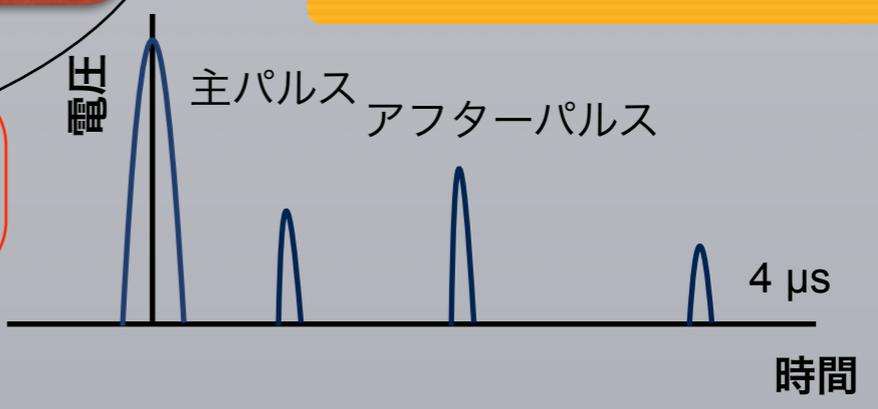
要求: **量子効率**

ピーク値>32%

ピーク値平均
41%→43% (HPK)

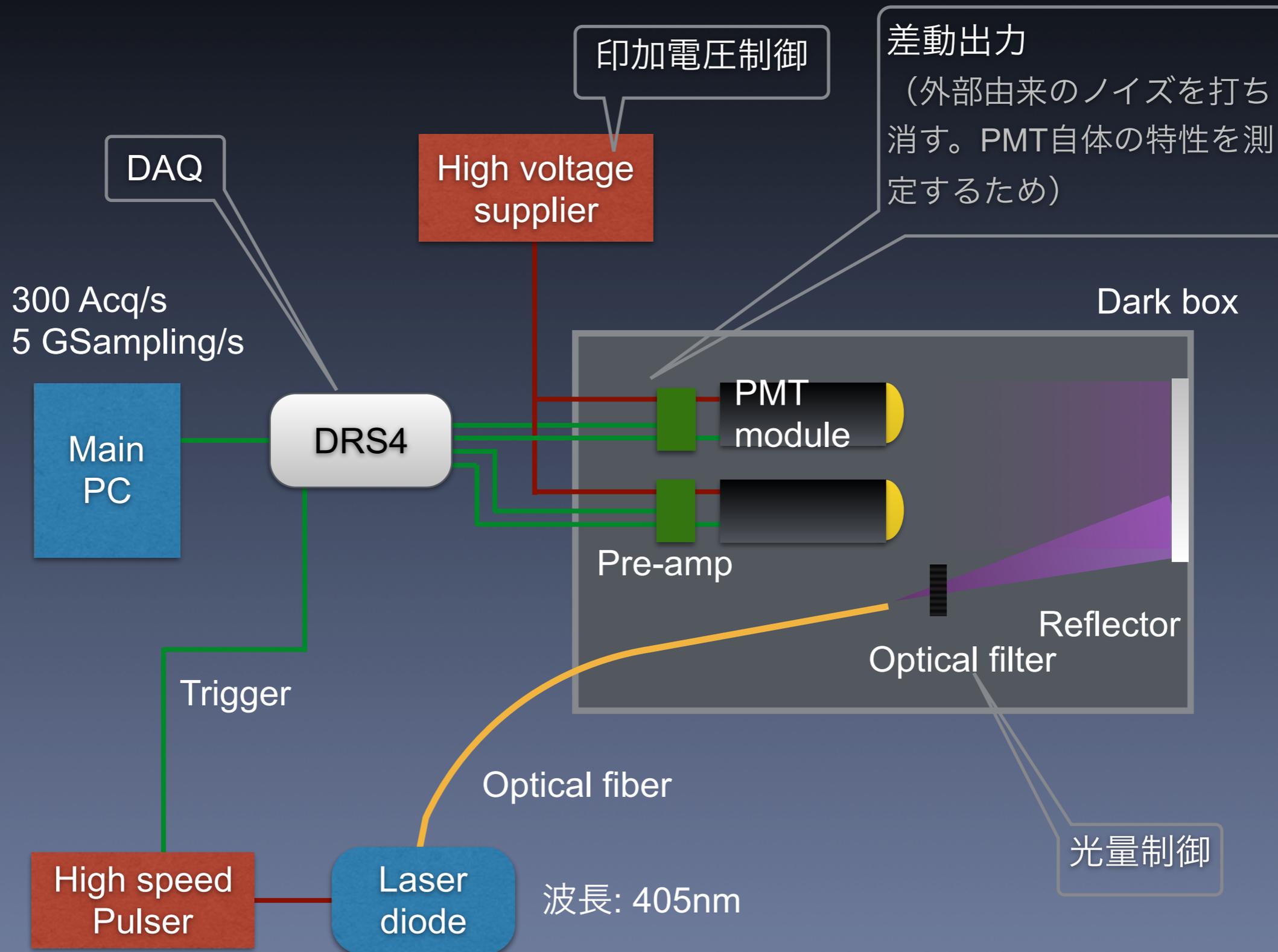
電氣的ノイズ

要求: カメラ
全体で <0.2 p.e.



光電子増倍管の 測定及び解析

セットアップ



測定方法 (ゲイン・過剰雑音係数)

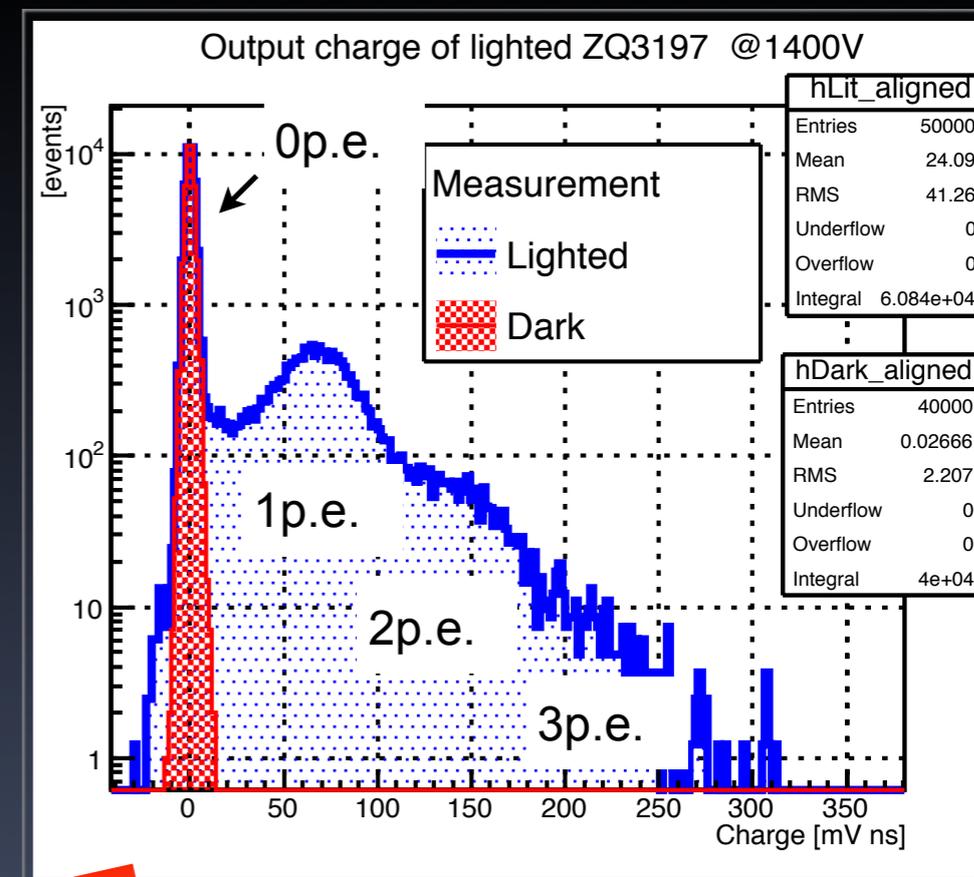
1. 高電圧・低光量の下で測定した出力電荷量分布から、single p.e. に対する応答分布を推定

- ▶ ゲイン（絶対値）及び過剰雑音係数を得る

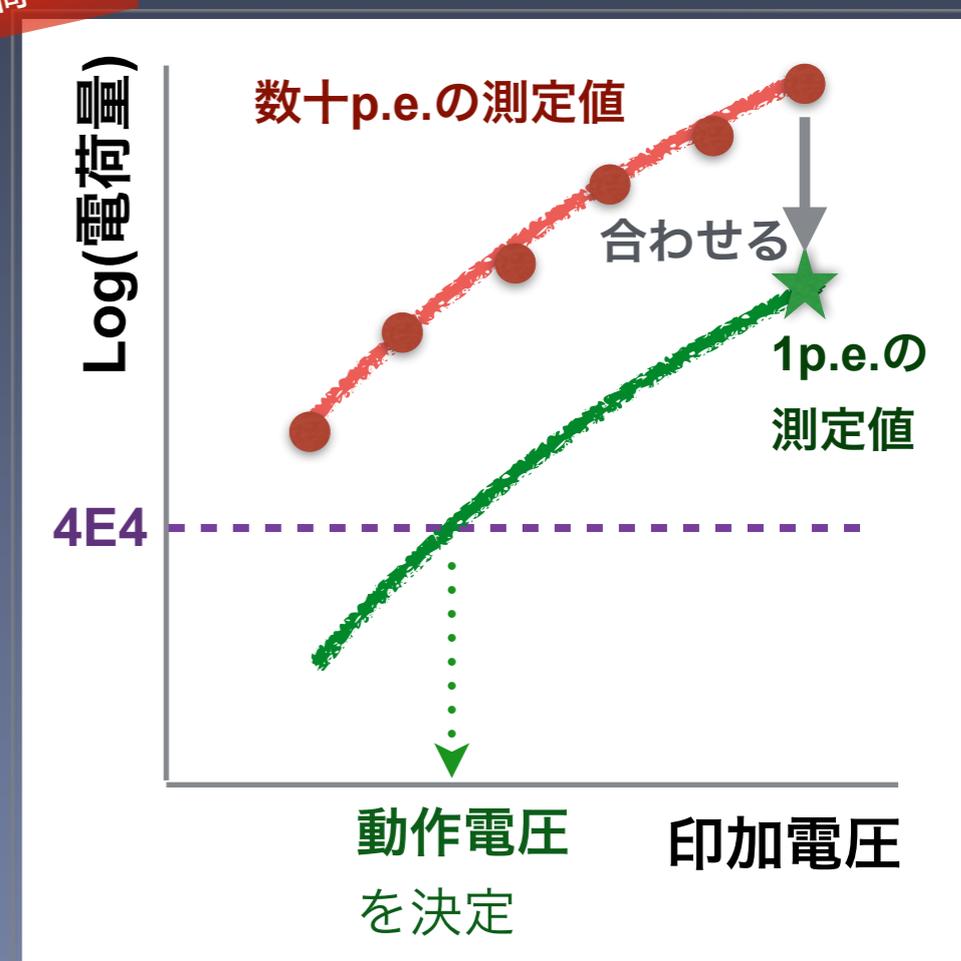
2. 光量を上げ、印加電圧を変えながら出力電荷量を測定

- ▶ 相対的なゲイン曲線を得る

3. 1の値で2をnormalizeし、絶対値のゲイン曲線を求める



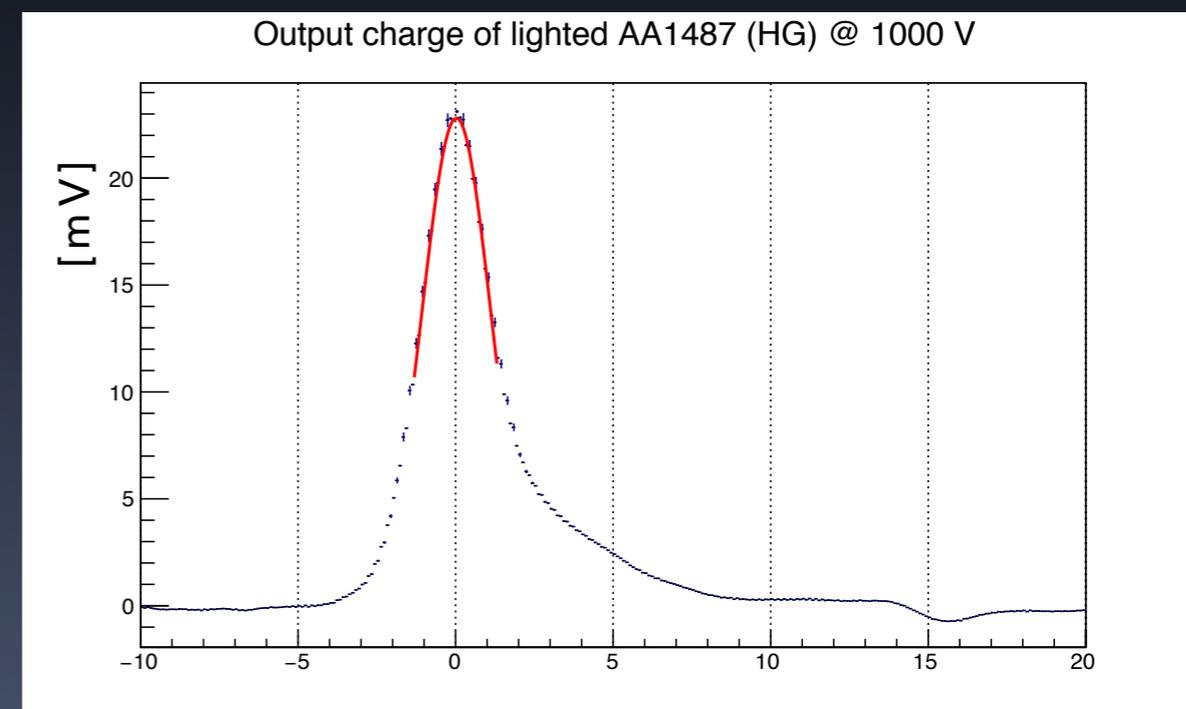
詳細は第70回年次大会 高橋 他



測定方法（パルス幅、電気的ノイズ）

4. 同時に、各電圧におけるパルス幅を測定

- ▶ 1000イベントの波形を平均
- ▶ ガウス関数でフィッティング
- ▶ σ を2.35倍した値をパルス幅とする
 - 半値全幅との換算



[ns]

5. 各電圧で光を照射しない状態での出力電荷量を測定

- ▶ 1000イベントの標準偏差をノイズレベルとする
- ▶ セットアップが異なるため、実際のLSTカメラ全体の電気的ノイズとは異なる

6. その他アフターパルス発生確率などを測定する必要があるが、今回は行わなかった

Single p.e. 測定の誤差の見 積もり

独自の解析法を採用したため、それに
依存する誤差を見積もりたい

測定で得られる電荷量のシミュレーション

◆ 真の single p.e. 分布を仮定

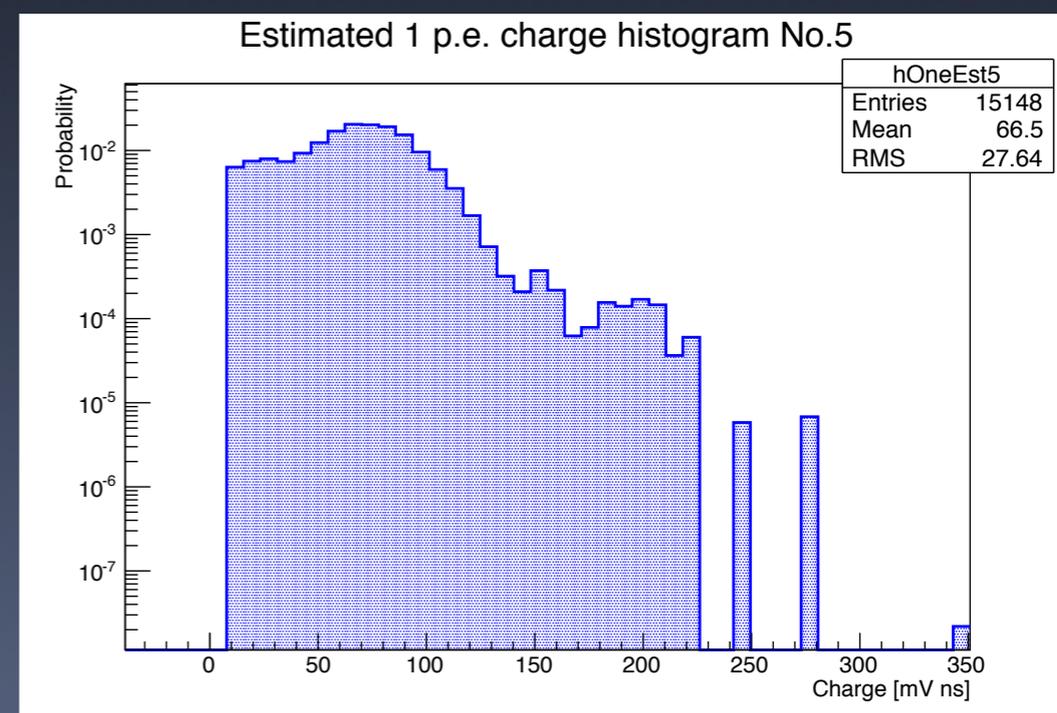
- 今回は、解析で推定した single p.e. 分布をそのまま流用した

- ▶ 誤差の算出としては必ずしも正しくないが、簡単に傾向を確認するため

- 仮定した分布からゲインと過剰雑音係数を計算し、これを真の値とする

- ▶ 今回の場合は、解析で導いた値と等しいのでそのまま用いる

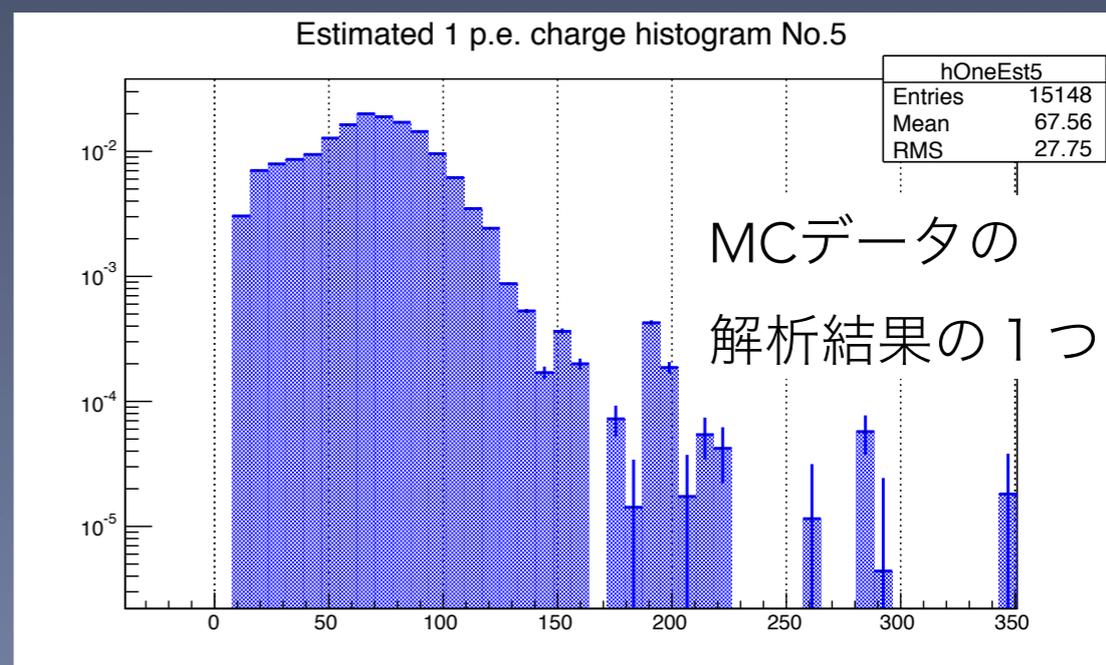
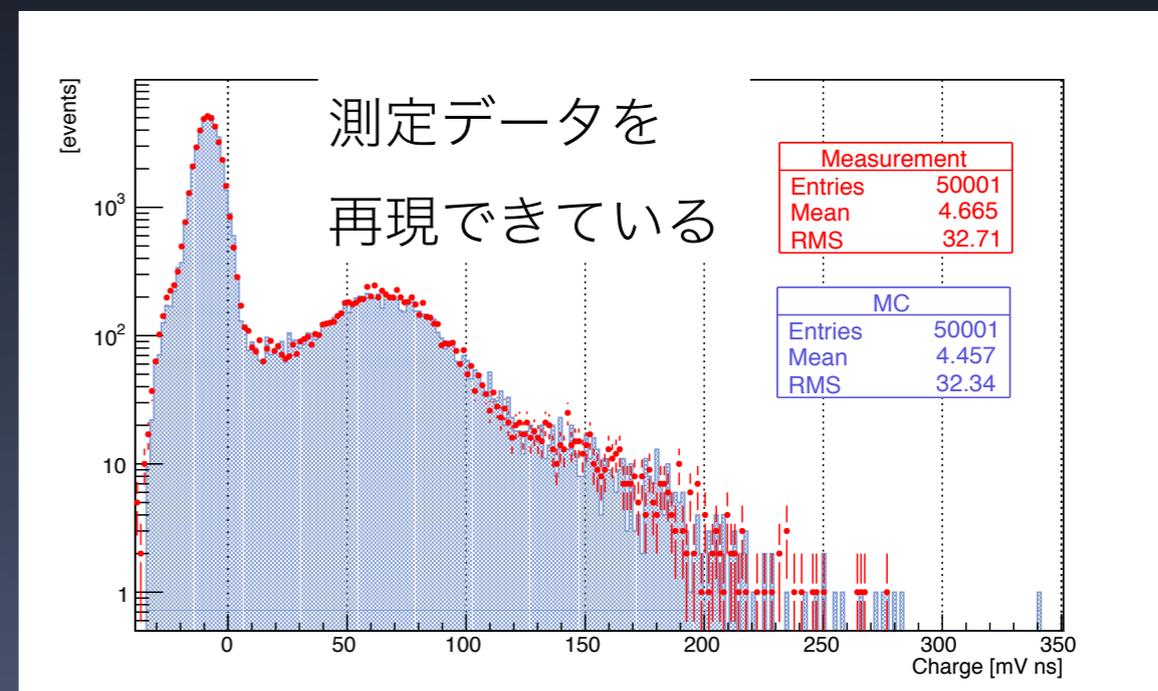
仮定した真の single p.e. 分布



- ◆ 入射光電子数はポアソン分布、1 光電子に対する応答電荷量分布は上記の分布に従うと仮定し、測定量を作る

MCデータの解析

- ◆ 測定イベント数と同じ回数(右の例では50,001回)行ってヒストグラムに埋め、測定データを模擬
- ◆ 測定データの場合と同様にこの分布を解析
→1000回繰り返す

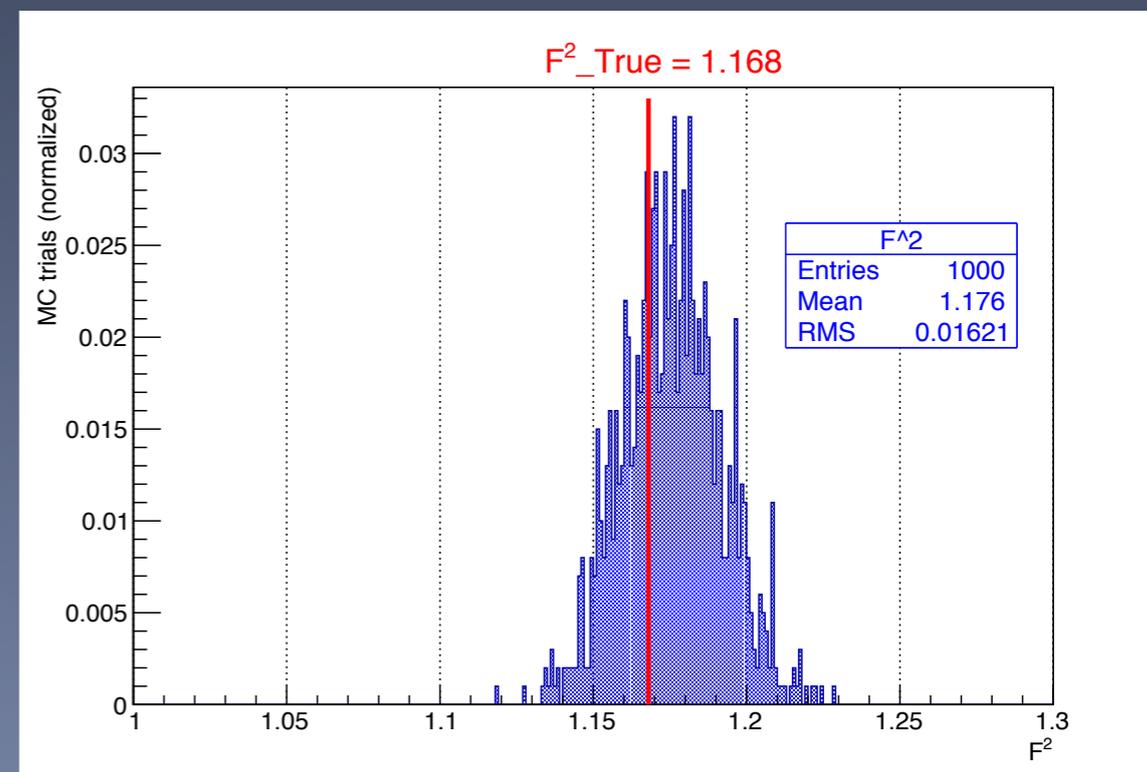
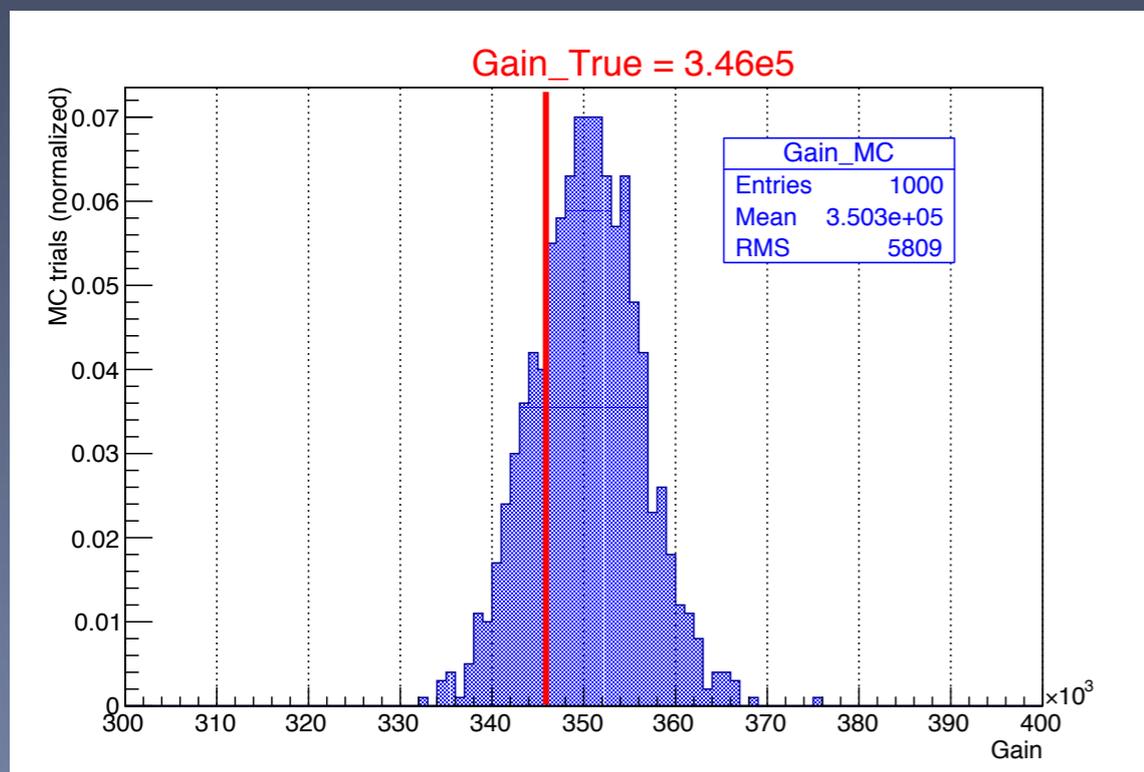


MCデータの解析結果

◆ 7段PMT AA1487@1400Vの場合

測定におけるすべての
系統誤差・統計誤差が考慮
できているわけではない

	ゲイン	F ²
MC (平均 ± 標準偏差)	$(3.50 \pm 0.06) \times 10^5$	1.176 ± 0.016
cf. 真の値 (仮定)	3.46×10^5	1.168
解析法由来の系統誤差	~ +1.2%	~ +0.7%
PMT応答の揺らぎによる統計誤差	~ ±1.7%	~ ±1.4%



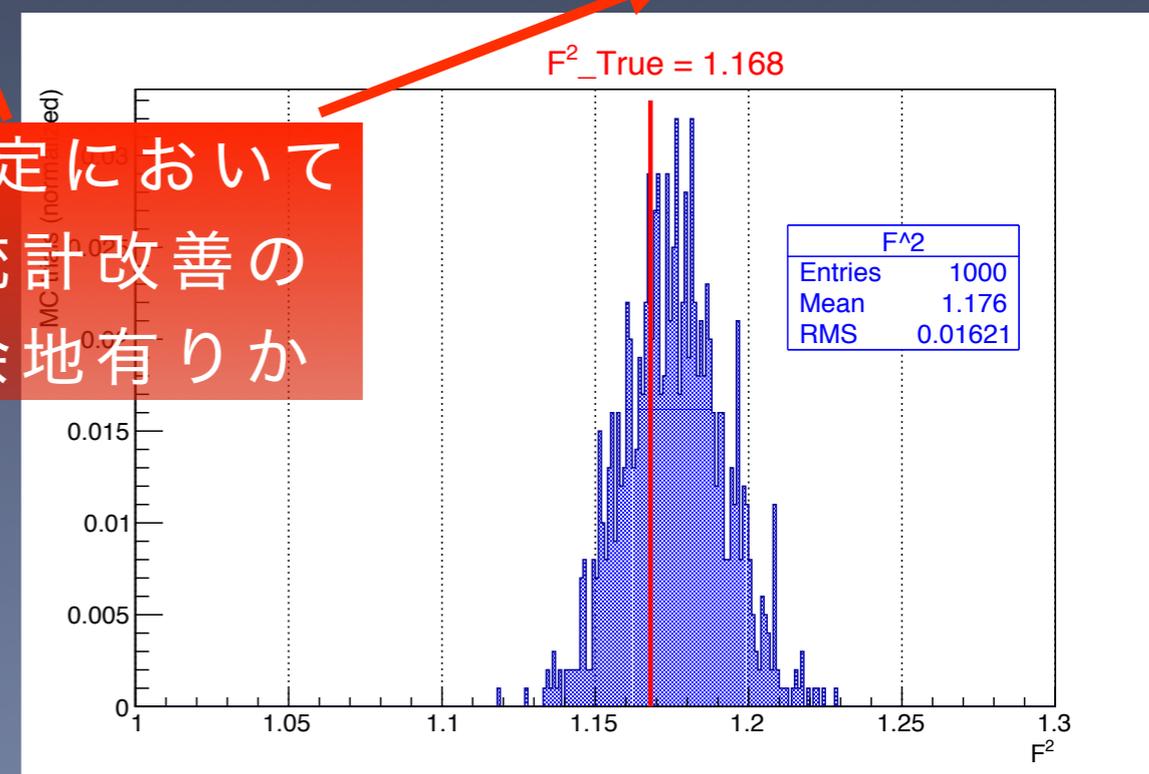
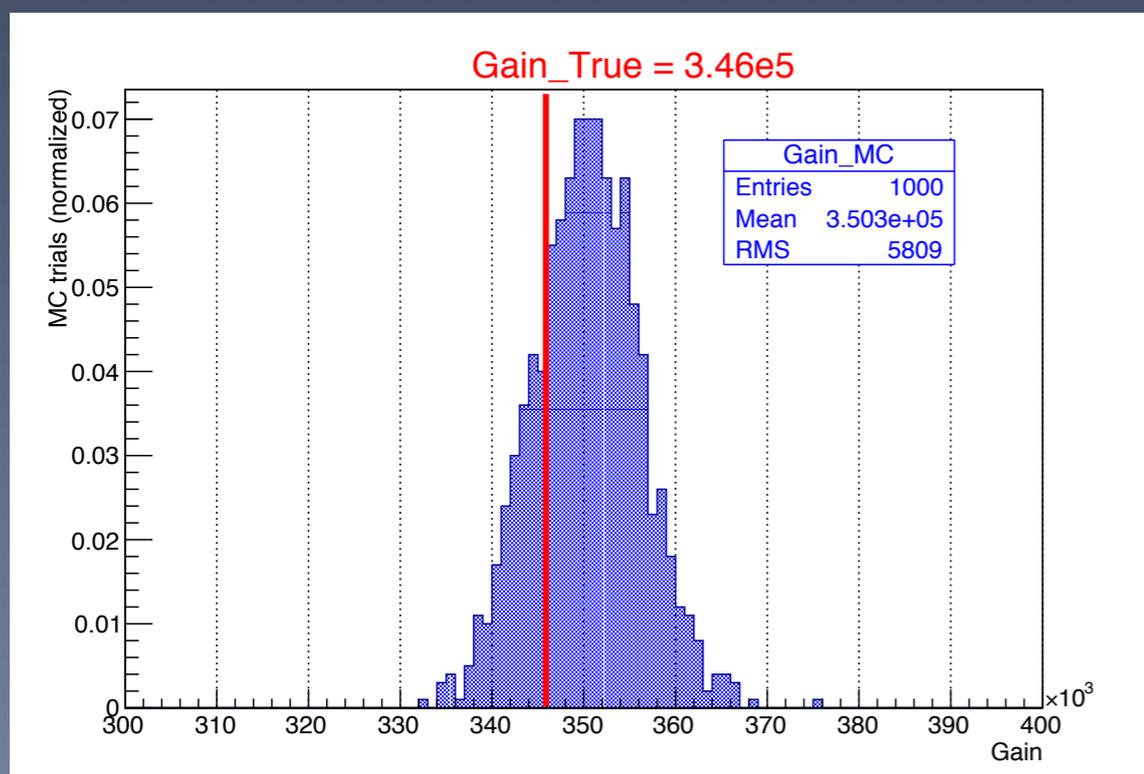
赤線は仮定した真の分布に基づく値

MCデータの解析結果

◆ 7段PMT AA1487@1400Vの場合

測定におけるすべての
系統誤差・統計誤差が考慮
できているわけではない

	ゲイン	F ²
MC (平均 ± 標準偏差)	$(3.50 \pm 0.06) \times 10^5$	1.176 ± 0.016
cf. 真の値 (仮定)	3.46×10^5	1.168
解析法由来の系統誤差	~ +1.2%	~ +0.7%
PMT応答の揺らぎによる統計誤差	~ ±1.7%	~ ±1.4%



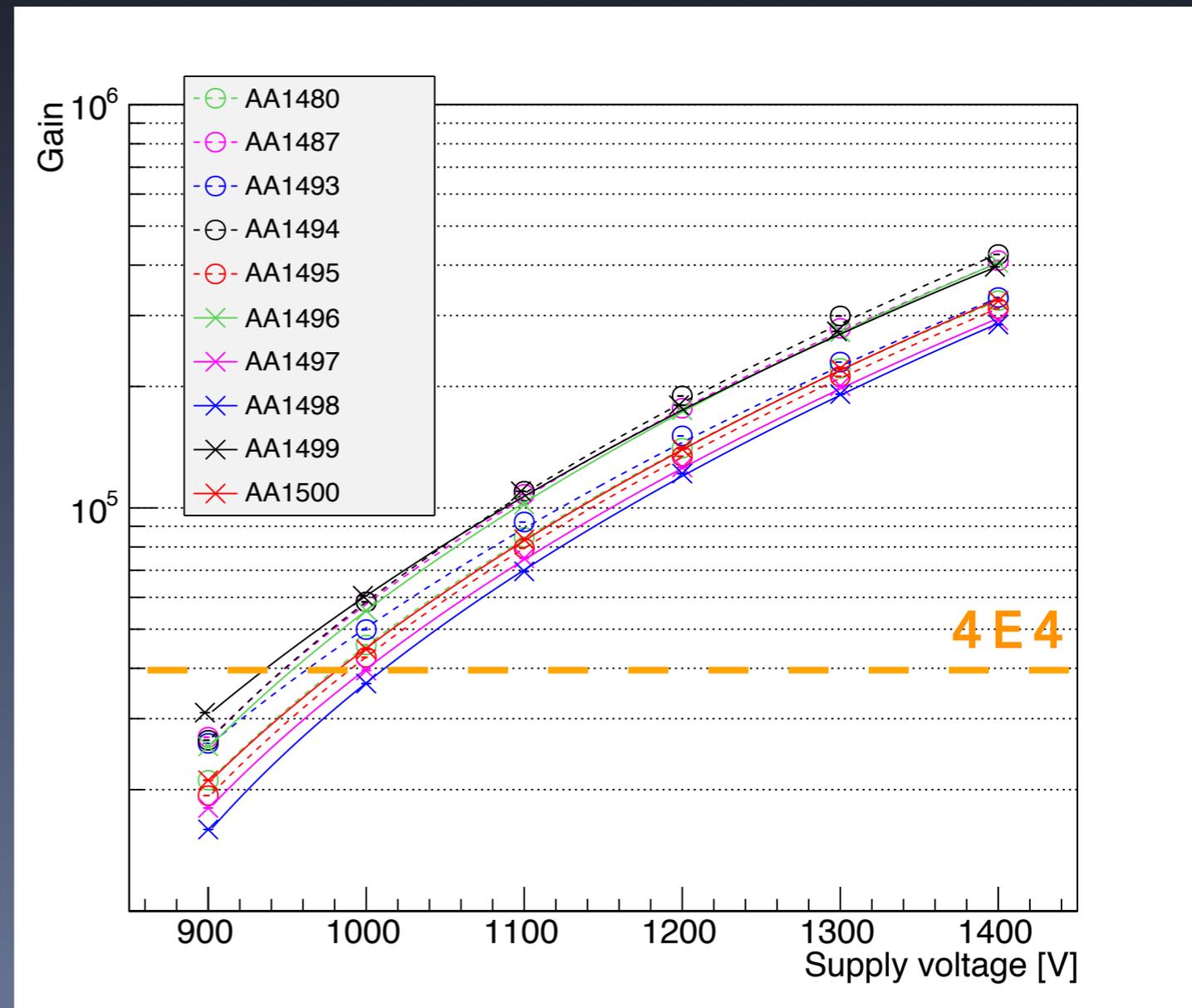
測定において
統計改善の
余地有りか

赤線は仮定した真の分布に基づく値

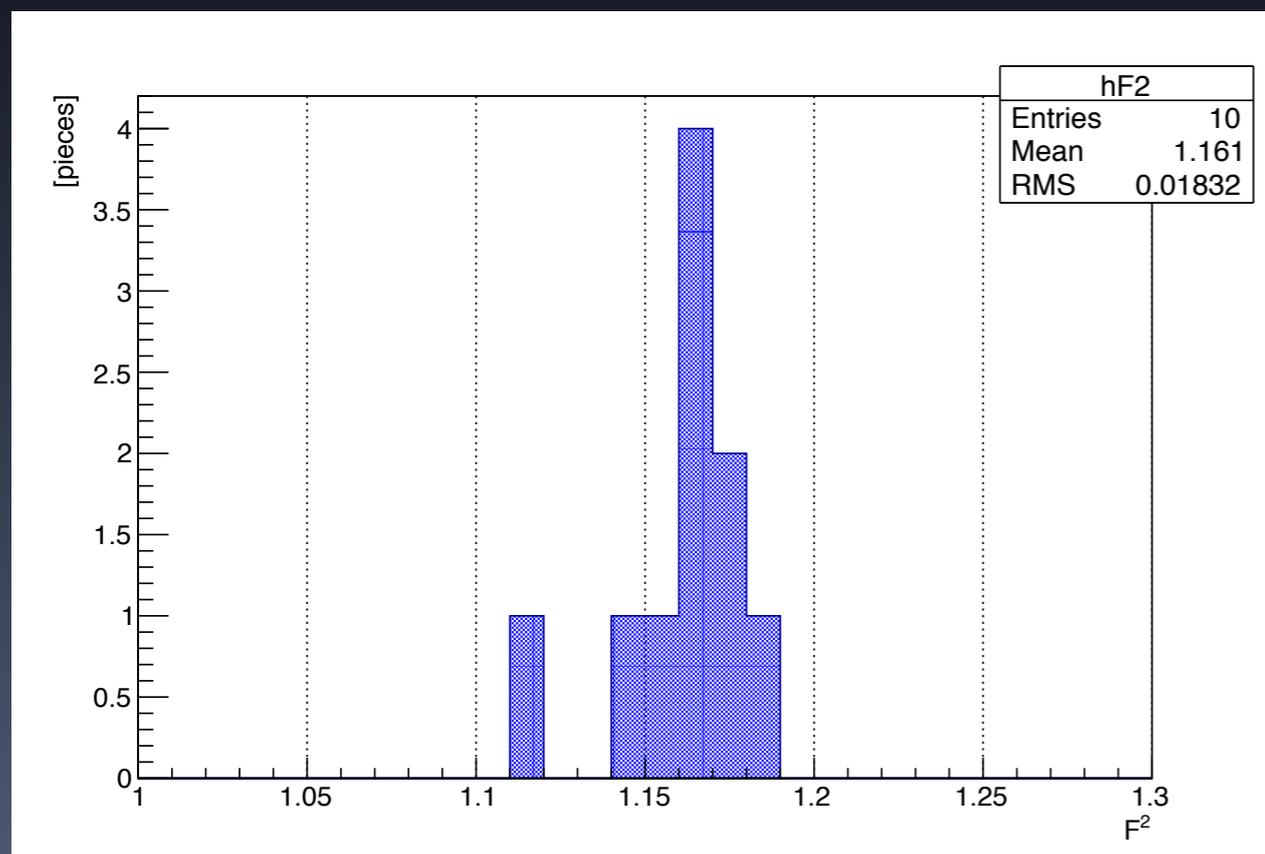
特性評價結果

ゲイン-印加電圧曲線

- ◆ ゲインが4万となる電圧は948 - 1012 V に分布
- ◆ single p.e. 測定に由来するゲインの誤差が少なくとも1%程度あるとみられる
 - 電圧に対しては4%程度

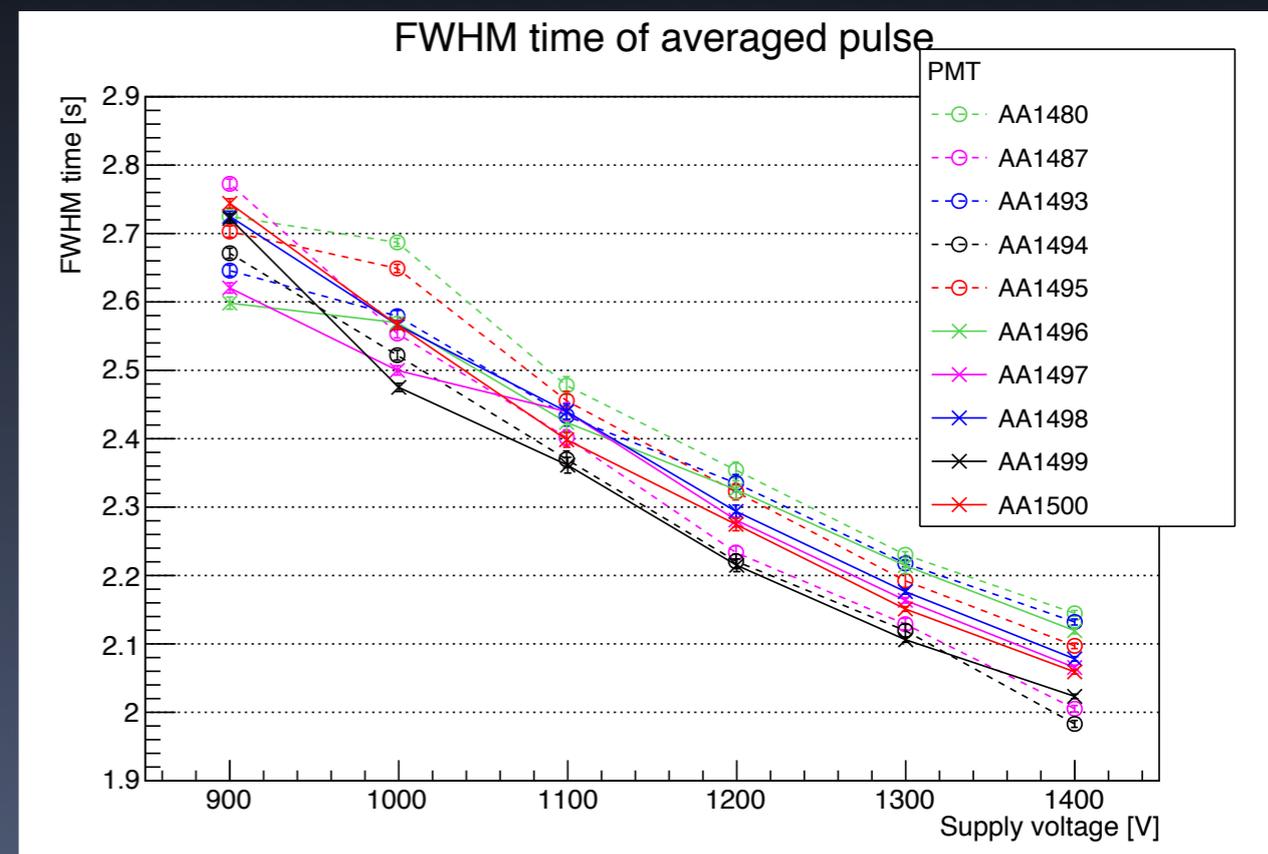


過剰雑音係数



- ◆ F^2 は 1.11 - 1.19 にかけて分布
- ◆ 平均 1.16
- ◆ PMT に由来する観測電荷量の揺らぎが ~8% となる優れた性能値

パルス幅

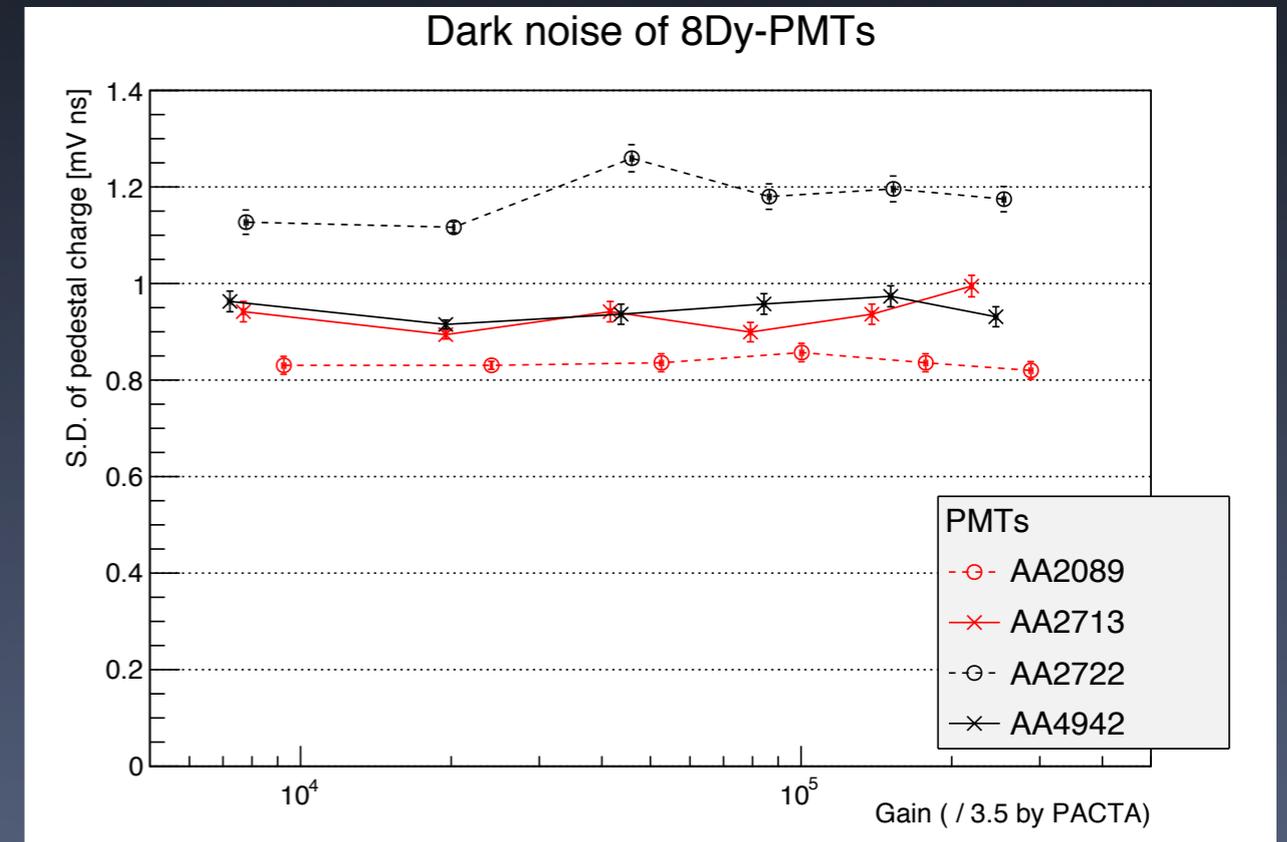
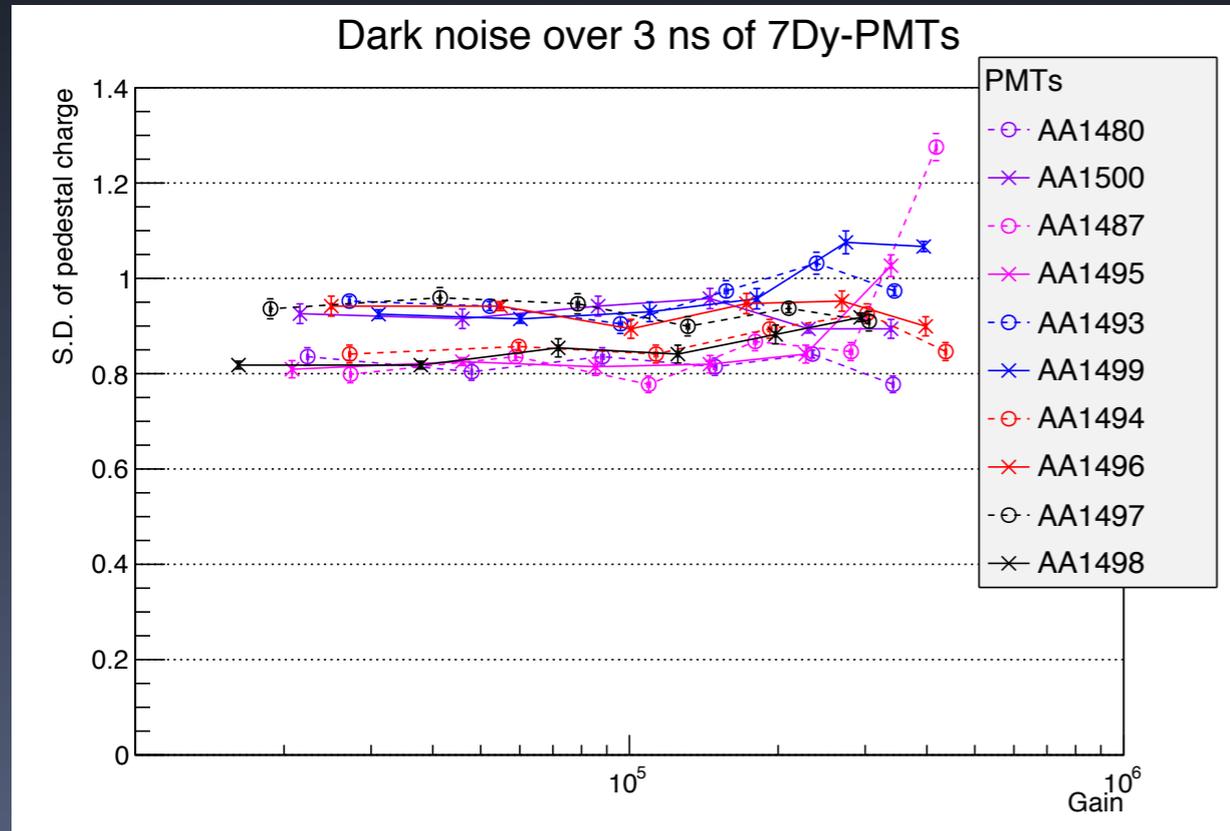


- ◆ いずれのPMTも 900 V で 2.8 ns を切り、ゲイン 4 万となる電圧で平均 3 ns 以下という要求を十分に満たしている
- ◆ R11920 (8 段) が 900 V で 3.1 - 3.4 ns 程度であったのと比べると大きく改善した

電氣的ノイズ

R12992-100 (7段)

cf. *R11920-100* (8段)



- ◆ *R11920* (8段)と同水準
- ◆ 約0.12 p.e. に相当
- ◆ うち約0.08 p.e. はプリアンプ由来と見積もられる
- ◆ ゲイン、印加電圧によらずおおよそ一定

まとめ

- ◆ CTA-LST 2号機以降に向け、PMTのダイノードを8段から7段に変更したR12992-100を開発
 - ゲインを抑えより長寿命に
 - 時間特性を改善し、S/N比が向上
- ◆ 10本についてゲイン、過剰雑音係数 F 、パルス幅、電氣的ノイズを測定し性能の評価を行った
 - ゲインの測定にあたって誤差を見積もるためMCシミュレーションを行った
 - ゲインが4万となる動作電圧は948 - 1012 V
 - F^2 は平均1.16
 - ゲイン、 F^2 ともに少なくともパーセントオーダーの系統誤差と統計誤差があるとみられる
 - 測定において統計を改善する余地があると考えられる
 - パルス幅は2.8 ns以下と大きく改善し、要求を十分に満たしている
 - 電氣的なノイズは8段PMTと同水準
- ◆ これまでに評価した項目について、LSTの光検出器として問題無いと言える