

# CTA大口径望遠鏡焦点面検出器の エネルギー較正

16 Oct., 2019  
@YMAP研究会

東京大学宇宙線研究所

M2 小林志鳳

# 自己紹介

名前：小林 志鳳, Yukiho Kobayashi  
(初見で読まれたことなし)

山口県出身。

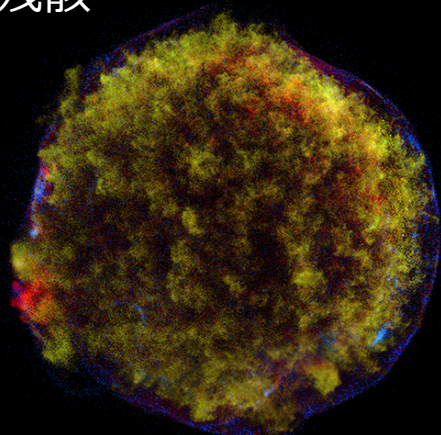
BUMP OF CHICKENというバンドが好き。  
自分でもギターを弾く。

イタリア出張の際にヴェネチアにて



# ガンマ線天文学

超新星残骸



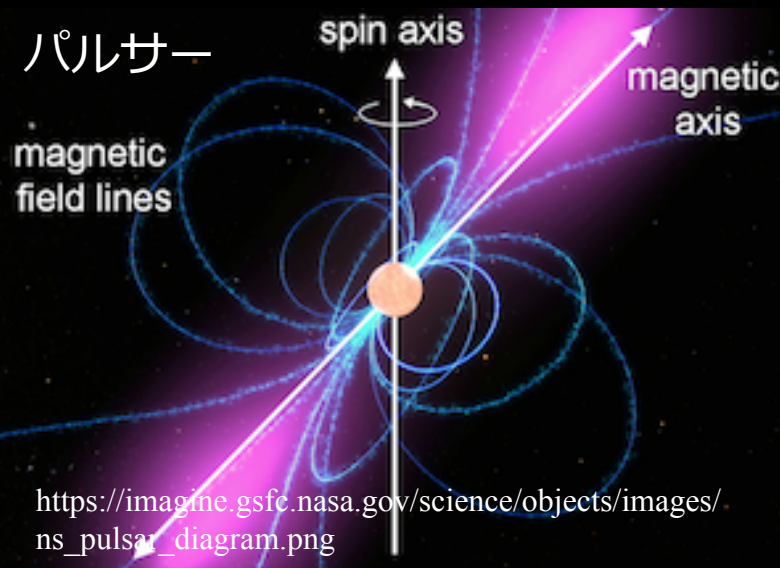
[https://chandra.harvard.edu/photo/2016/tycho/tycho\\_2000\\_xray.jpg](https://chandra.harvard.edu/photo/2016/tycho/tycho_2000_xray.jpg)

活動銀河核



<https://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/?search=black+hole&category=Universe#submit>

パルサー



[https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/objects/images/ns\\_pulsar\\_diagram.png](https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/objects/images/ns_pulsar_diagram.png)

暗黒物質



[https://apod.nasa.gov/apod/image/1701/bulletcluster\\_comp\\_2048.jpg](https://apod.nasa.gov/apod/image/1701/bulletcluster_comp_2048.jpg)



# Cherenkov Telescope Array, CTA

現在建設中のチェレンコフ望遠鏡アレイ。  
現行の望遠鏡の10倍高い感度と10倍広いエネルギー帯域を実現。  
大中小の望遠鏡が異なるエネルギー帯域を担う  
エネルギー帯域：20GeV-300TeV  
角度分解能 0.05度@1TeV、エネルギー分解能 8%@1TeV

## CTA北サイトの完成予想図

@カナリア諸島ラパルマ

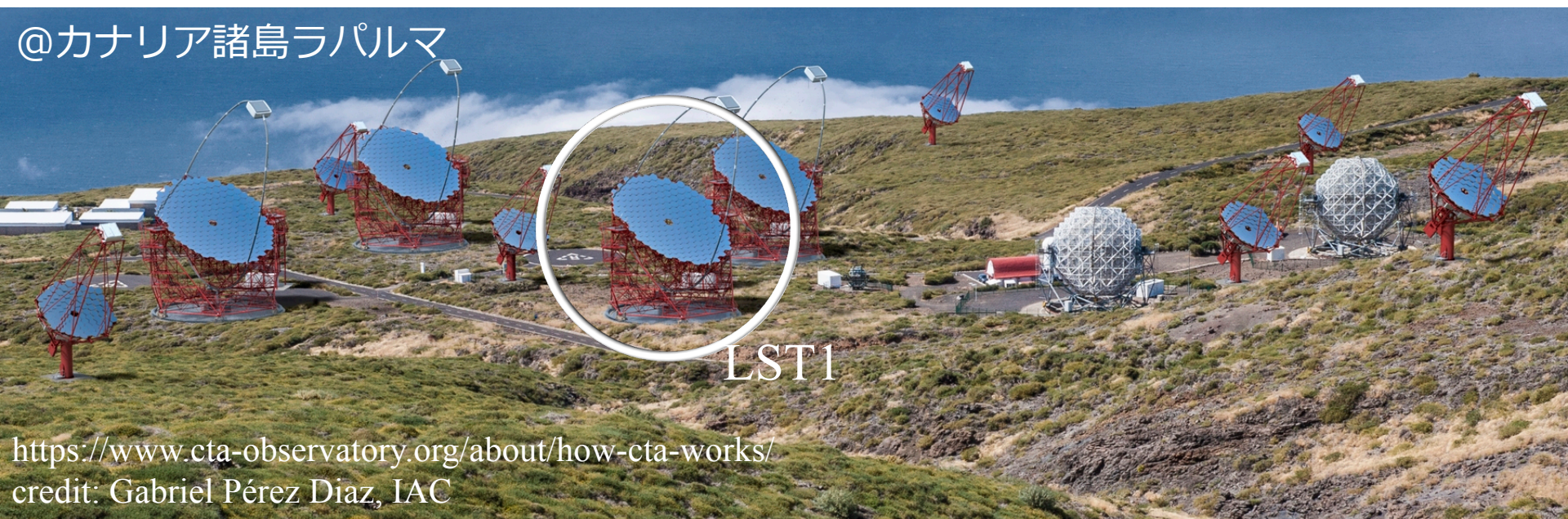


# Cherenkov Telescope Array, CTA

現在建設中のチェレンコフ望遠鏡アレイ。  
現行の望遠鏡の10倍高い感度と10倍広いエネルギー帯域を実現。  
大中小の望遠鏡が異なるエネルギー帯域を担う  
エネルギー帯域：20GeV-300TeV  
角度分解能 0.05度@1TeV、エネルギー分解能 8%@1TeV

CTA北サイトの完成予想図

@カナリア諸島ラパルマ



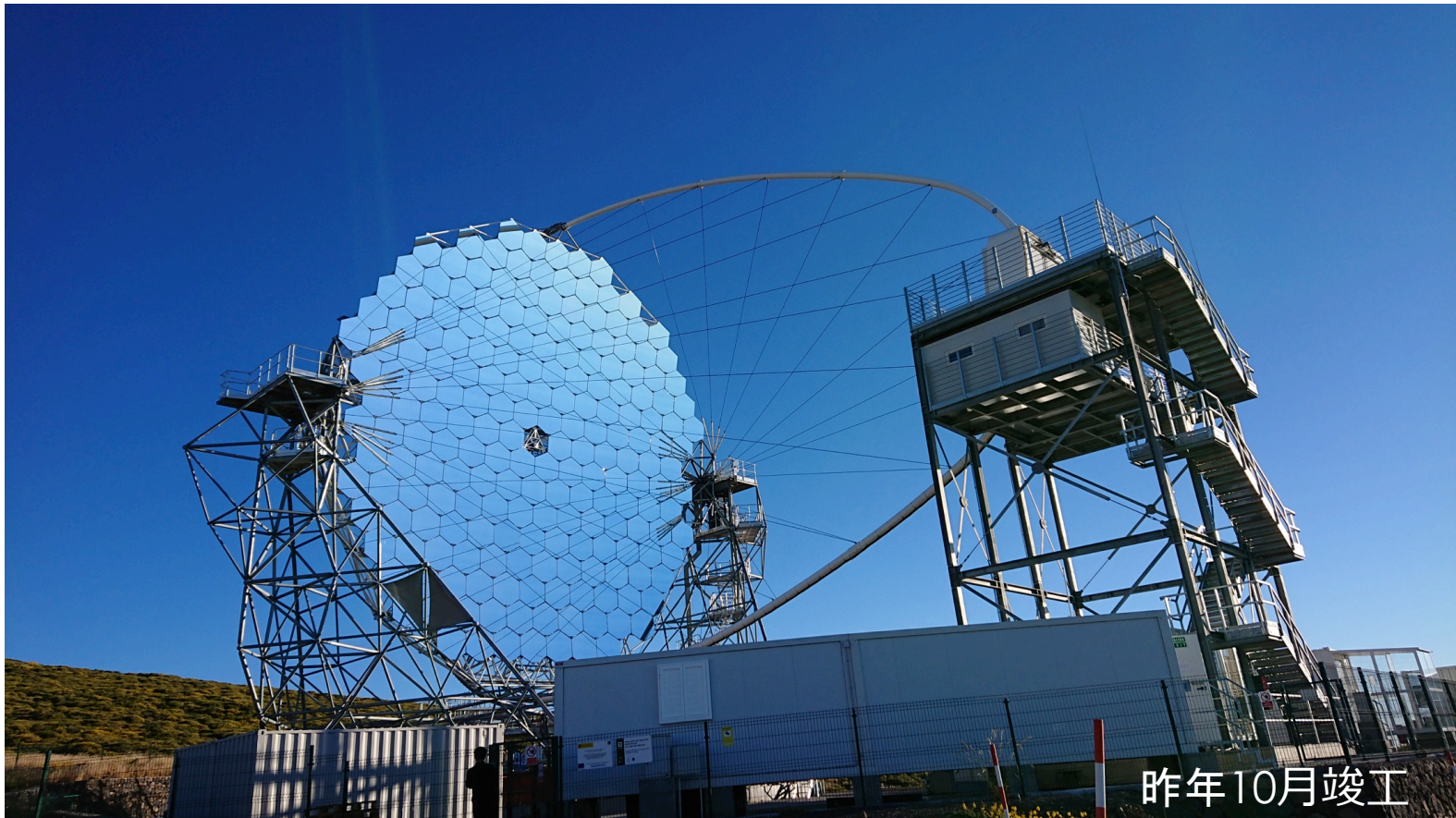
LST1

<https://www.cta-observatory.org/about/how-cta-works/>  
credit: Gabriel Pérez Díaz, IAC

# 大口径望遠鏡(LST)

広い反射鏡と高感度のカメラにより暗いチェレンコフ光を捉える。  
→ 比較的lowエネルギーのガンマ線に感度を持つ。

エネルギー帯域: 20GeV - 3TeV



昨年10月竣工

# 大口径望遠鏡(LST)

広い反射鏡と高感度のカメラにより暗いチェレンコフ光を捉える。  
→ 比較的lowエネルギーのガンマ線に感度を持つ。

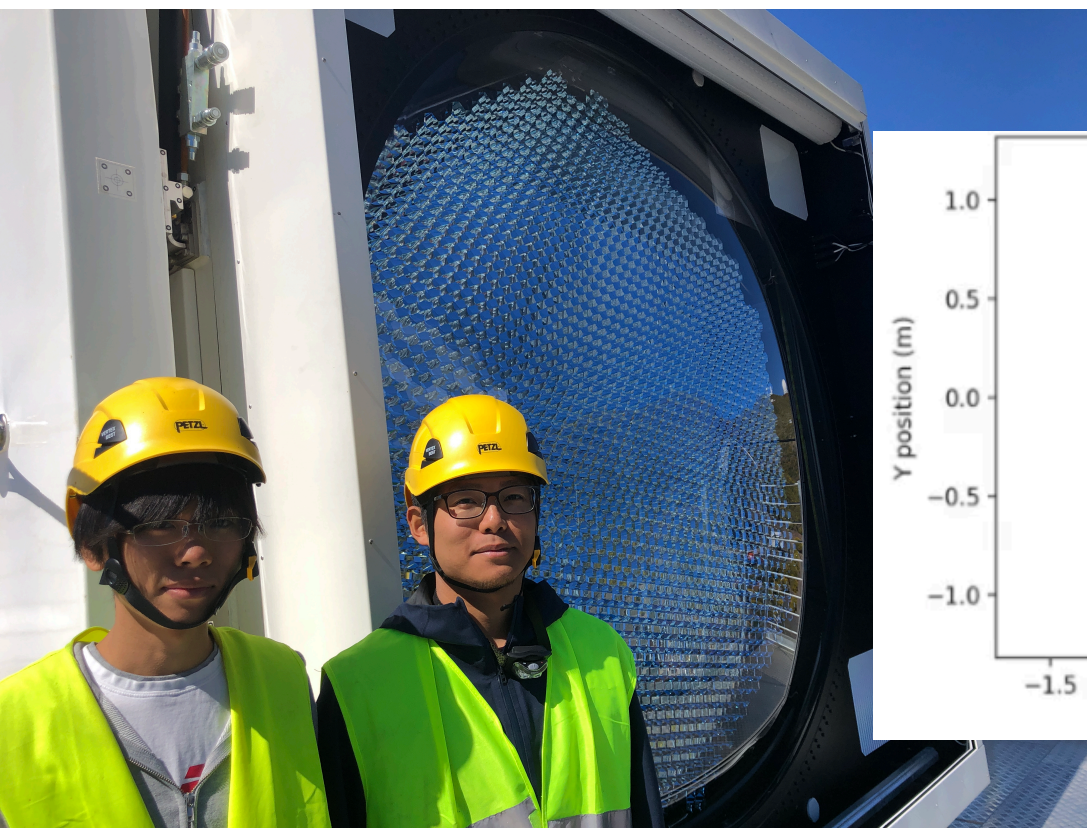
エネルギー帯域: 20GeV - 3TeV



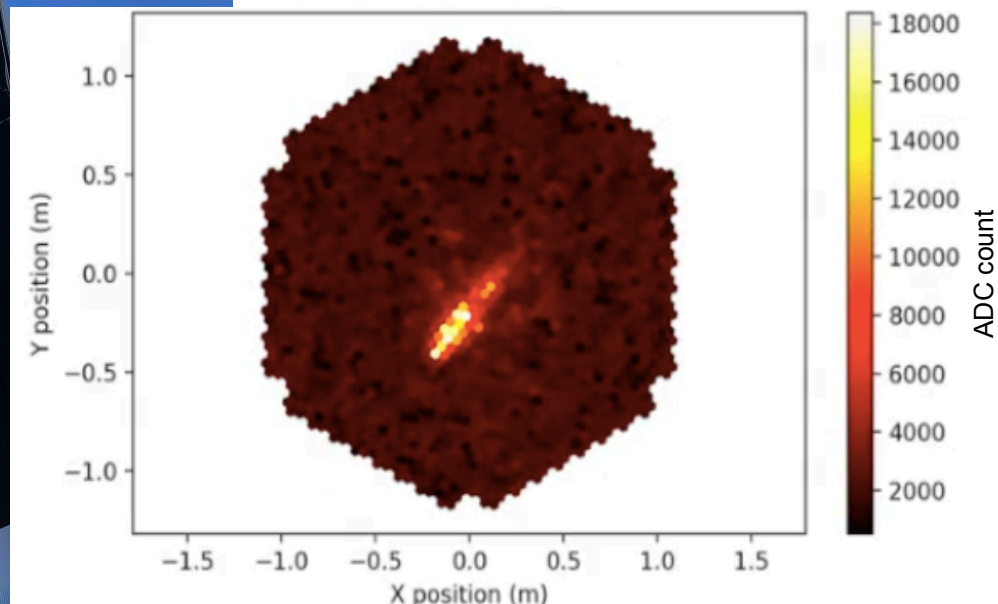


# 焦点面検出器(PMTカメラ)

1855本の光電子増倍管(PMT)から成る検出器で空気シャワーを撮像。  
夜光を除いて短いチェレンコフ光を捉えるためにGHzで波形をサンプリング。  
40%という高い量子効率で低エネルギー閾値の実現に貢献(MAGICは30%)。  
3桁に渡る広いダイナミックレンジを持つ(1光電子から1000光電子)。



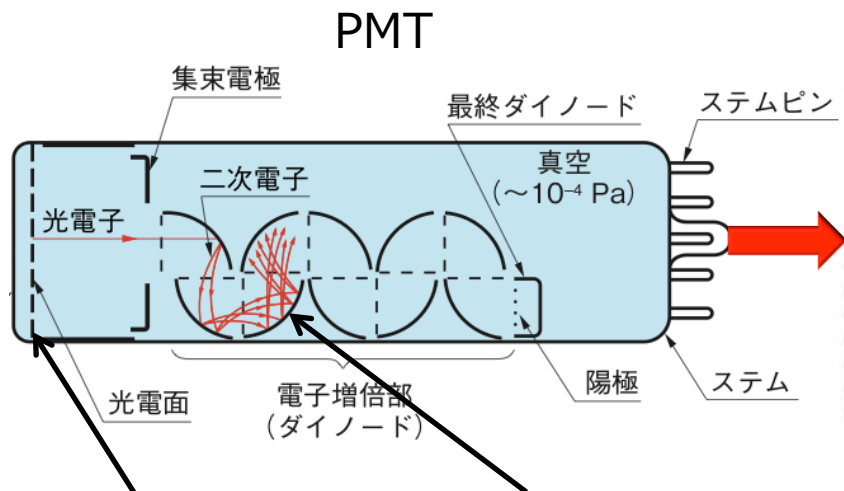
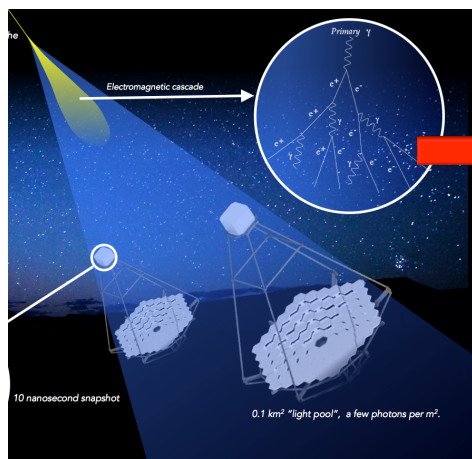
7月に実際に取られたシャワー像



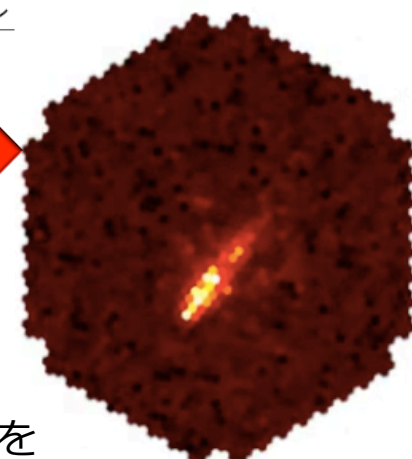
視野4.3度、1ピクセルは0.1度に相当。

# PMTによる光子の検出

チェレンコフ光子数  
 $N \propto E_\gamma$



電荷  
 $Q$



光電効果(確率 $p \sim 40\%$ )で光電子を生成  
ダイノードで電子数を増幅(増幅率 $G \sim 40000$ )

$$Q/e = N \cdot p \cdot G$$

$Q$  : 電荷[C]、 $e$  : 素電荷[C]、 $N$  : 入射光子数、 $p$  : 量子効率、 $G$  : 増幅率

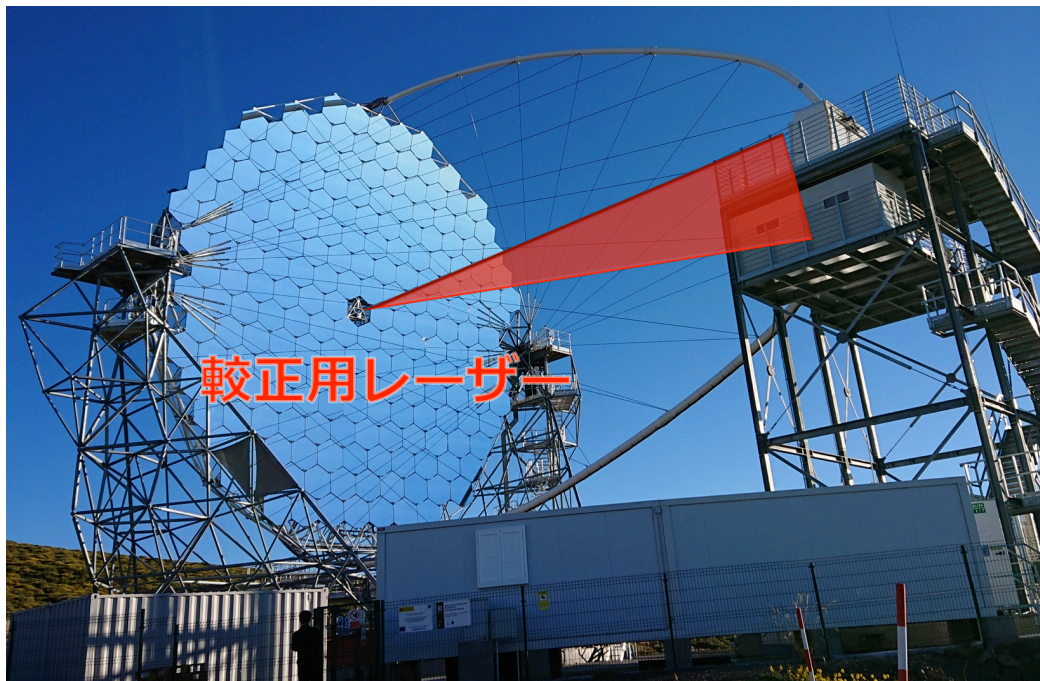
測定値 $Q$ から光子数 $N$ を知るには、増幅率 $G$ を知らなければならない。  
しかし、 **$G$ は環境によって変化してしまう。**

# 較正用イベントの取得

増幅率Gは環境によって変化してしまう。

→観測中も常に増幅率をモニタする必要がある。

較正用パルスレーザーでカメラ全体を照らしたイベントと  
何も無いバックグラウンドイベントを周期的(観測時は50Hz程度)に取得。  
これらのイベントから検出器の増幅率を計算する。



較正用パルスレーザー

波長 : 355nm

波形 :  $\exp(-t/1.6\text{ns})$

フィルターで強度を変えられる。  
可能な強度の領域はカメラのダイナミックレンジを覆っている。

STV-01E-1x0355

by teem photonics

# Fファクター法

$$\overline{Np} = \frac{(\overline{Q} - \overline{\text{ped}})^2}{\sigma_Q^2 - \sigma_{\text{ped}}^2} F^2$$

光電子数

Q : レーザーの電荷  
ped : バックグラウンドの電荷

$$F = \sqrt{1 + \frac{\sigma_G^2}{G^2}}$$

Fファクター(増幅率の揺らぎの指標)  
LSTカメラでは  $F^2 = 1.2$

これにより光電子数が求まれば、

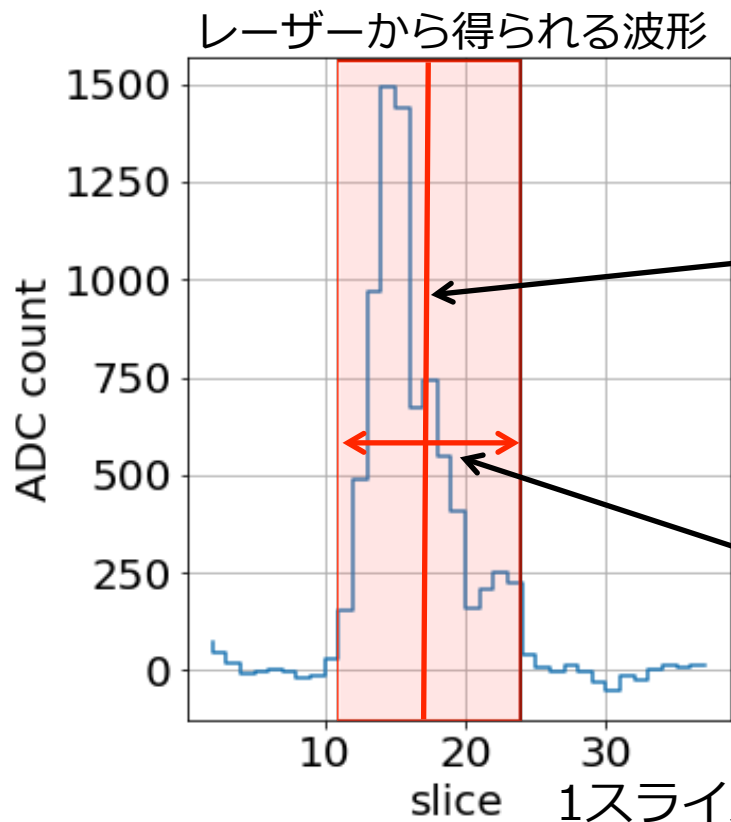
$$\overline{G} = \frac{\overline{Q}/e}{\overline{Np}}$$

として増幅率が求まり、出力電荷を光子数に直すことができる。

**観測中も較正用のデータを取得・解析して  
増幅率をモニタすることが可能。**

# 増幅率を求める際の課題

電荷 $Q$ を得るためには波形を時間積分しなければならない。  
しかし、波形を積分する位置、幅によって電荷は変わる。  
変換係数を推定するのに最適な積分方法は何なのか。



積分する位置をどうやって決めるか。

- 波形のピーク？
- 重心？

積分幅を何スライスにするのが適切なのか。

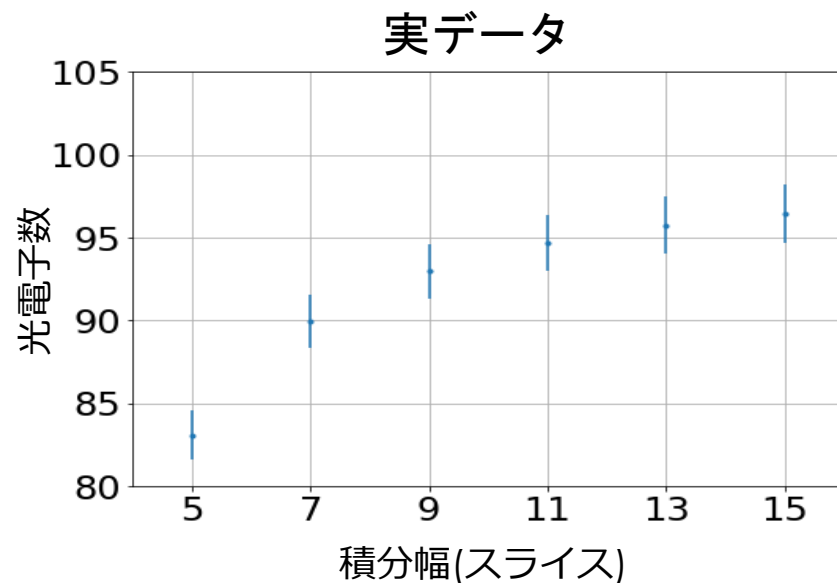
- 波形全体の積分が必要？
- 一部分だけでも十分？

# 波形積分方法の最適化

積分位置は積分値が最大になるように決めた。

シミュレーションから11スライス以上の積分で光電子数を推定できることが示唆された。実データでも積分幅と推定光電子数の関係は統計誤差内で同様の傾向を示している。

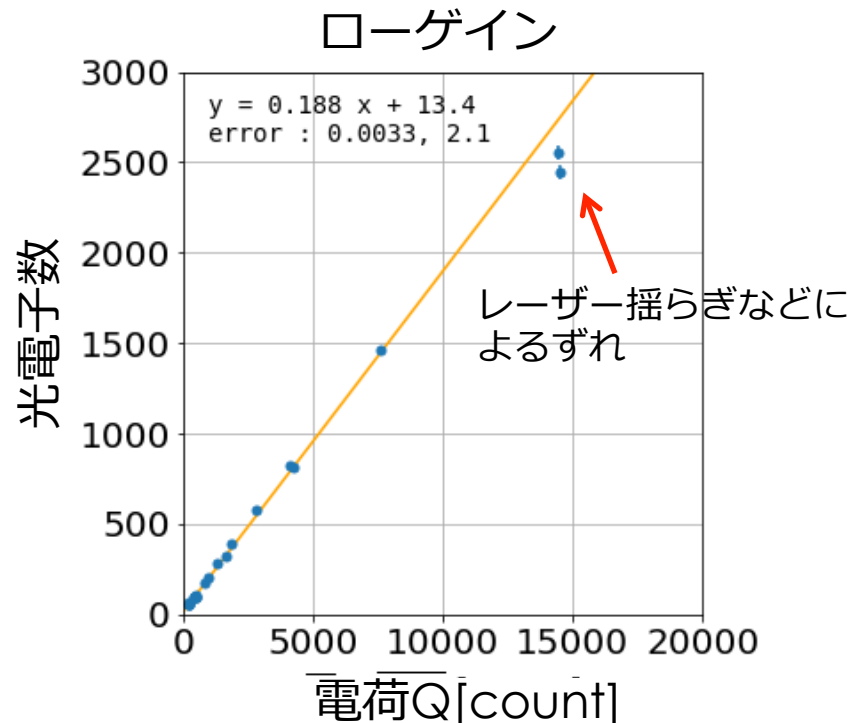
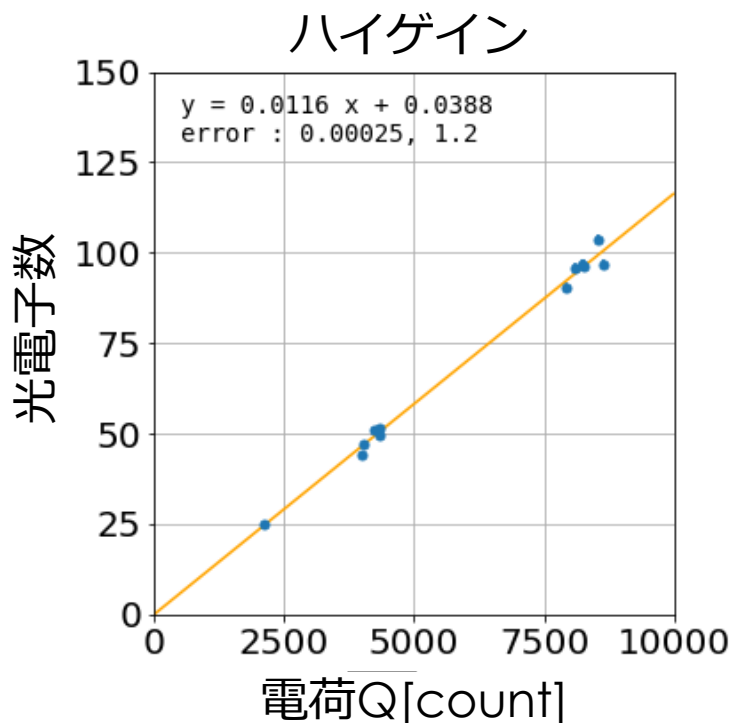
ただし、シミュレーションで得られる適切な積分幅は電気雑音の大きさに依存している可能性があり、今後さらに調べる必要がある。



シミュレーションにはチェレンコフ望遠鏡の検出器応答シミュレーションパッケージsim\_telarrayを用いた。  
[https://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/~bernlchr/sim\\_telarray/](https://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/~bernlchr/sim_telarray/)

# 実データの光電子数の推定

15スライス積分を用いて、いくつかのレーザー強度で光電子数を計算した。  
<1500phe. まで電荷と光電子数の線型性が確認された。  
高強度のデータでは、レーザー揺らぎなどの系統誤差で電荷分布が広がり、  
線型性が崩れると考えられる。

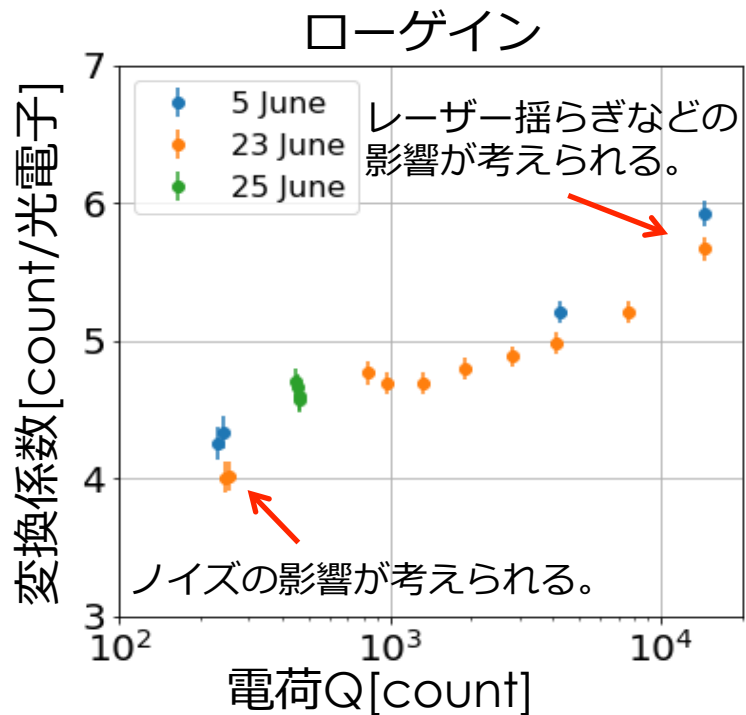
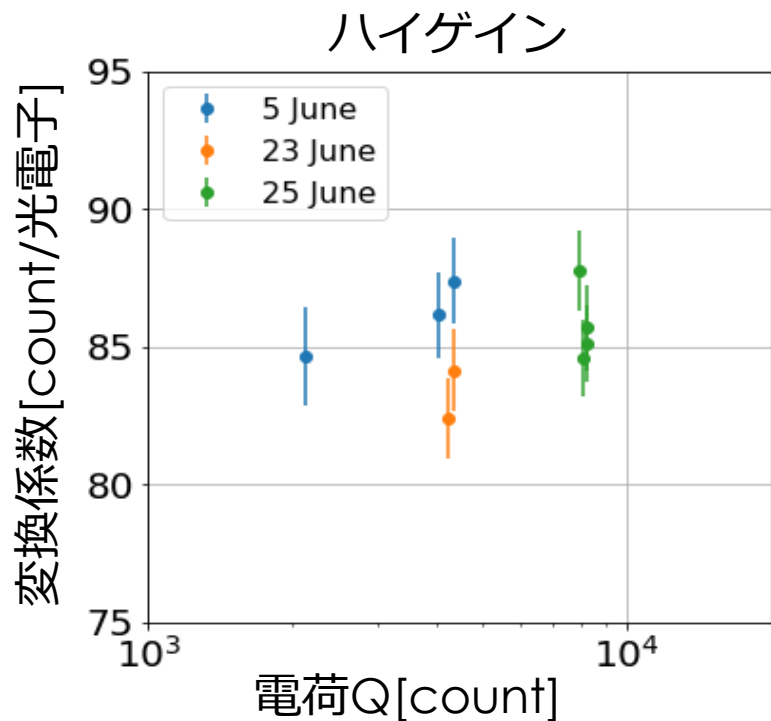


異なる2つの増幅率の経路を作ることによってダイナミックレンジを広げている。

# 実データの増幅率の推定

15スライス積分で、いくつかのレーザー強度で増幅率を計算した。

得られた変換係数はハイゲインで85count/光電子、ローゲインで4.7count/光電子。  
(統計誤差は2%程度)



但し、電気雑音の大きさによっては適切な波形積分方法が変わる可能性があるため、今後も詳しく調べる。



# まとめ

- ガンマ線のエネルギー推定には検出器の増幅率を知ることが重要。
- シミュレーションを用いて増幅率推定に適切な波形の積分方法を求めた。
- 実データを用いて統計誤差2%で増幅率を求めた。

## 今後の課題

- 適切な波形積分の方法をより詳しく調べるために、シミュレーションでの電気雑音の大きさを現実に即したものにす。

Back Up

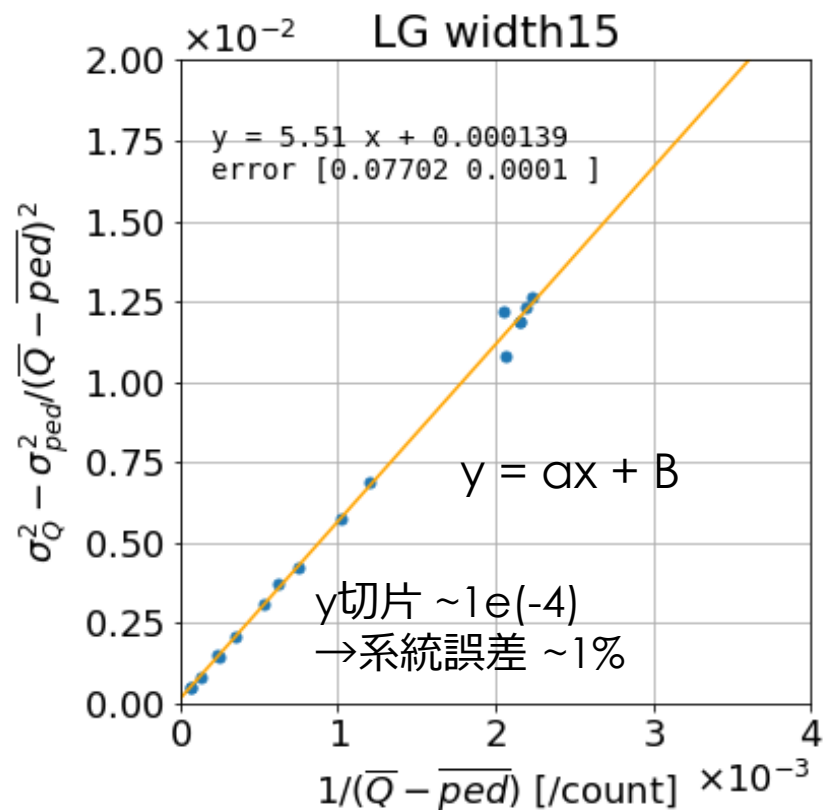
# 系統誤差の見積もり

右図のy切片が系統誤差の大きさを表す。

$$\underbrace{\frac{\sigma_Q^2 - \sigma_{ped}^2}{(\overline{Q} - ped)^2}}_y = F^2 g \underbrace{\frac{1}{\overline{Q} - ped}}_x + \boxed{B}$$

右図より系統誤差は  $1 \pm 0.4\%$  と見積もられる。

このうち0.7%はレーザー揺らぎが寄与していると考えられる。



# レーザーの系統的揺らぎ

1855ピクセルの電荷の平均値の分布を見ることでレーザーの系統的揺らぎを見積もった。

約10000イベント(~10秒)の間の揺らぎは0.7%程度であった。

同じ日の異なる時間のデータを見ても、平均強度の揺らぎは2時間くらいのスケールで0.5%程度であった。

## 1ピクセルあたりの平均電荷

