

CTA報告 195: CTA大口径望遠鏡のPMTにおける 出力応答の磁場依存性の測定

立石大^A, 小林志鳳^B, 砂田裕志^A, 佐々木寅旭^A, 齋藤隆之^B, 寺田幸功^A, 勝田哲^A,
猪目祐介^B, 岩村由樹^B, 大岡秀行^B, 岡知彦^C, 岡崎奈緒^B, 奥村暁^{D,E}, 折戸玲子^F,
片桐秀明^G, 櫛田淳子^H, 窪秀利^C, 郡司修一^I, 櫻井駿介^B, 高橋光成^B, 武石隆治^B,
田中真伸^J, 手嶋政廣^{B,K}, 門叶冬樹^I, 中森健之^I, 西嶋恭司^H, 野上優人^G, 野崎誠也^C,
野田浩司^B, Daniela Hadasch^B, Daniel Mazin^B, 山本常夏^L, 吉田龍生^G,
他CTA-Japan Consortium

埼玉大理^A, 東大宇宙線研^B, 京大理^C, 名大 ISEE^D, 名大 KMI^E, 徳島大理工^F, 茨城大理
^G, 東海大理^H, 山形大理^I, KEK 素核研^J, マックスプランク物理^K, 甲南大理工^L

背景: 焦点面検出器の磁場に対する検出器応答の検証

大口径望遠鏡(LST)の較正試験中に、性能に支障しない範囲での検出器応答の地磁気由来と思われる変動を発見。

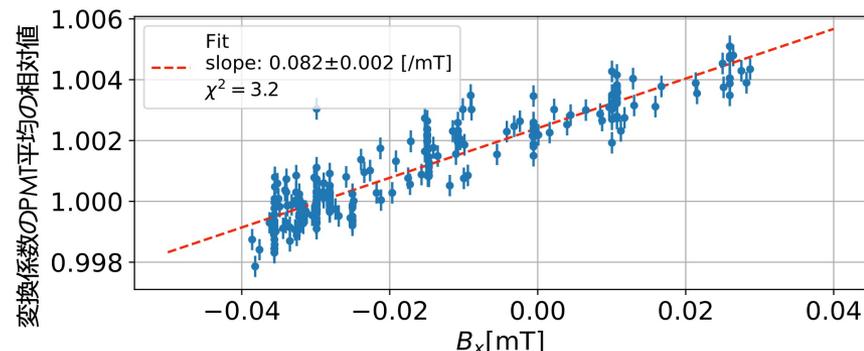
→LSTの「高い較正精度」と「優れた検出器の安定性」により発見

＜前回大会までの結果＞

LSTに使用されている光電子増倍管(PMT)の応答を深く理解するため、PMTに磁場を加え複数の光電子を出力する光量を照射。出力電荷の磁場依存性を調査。

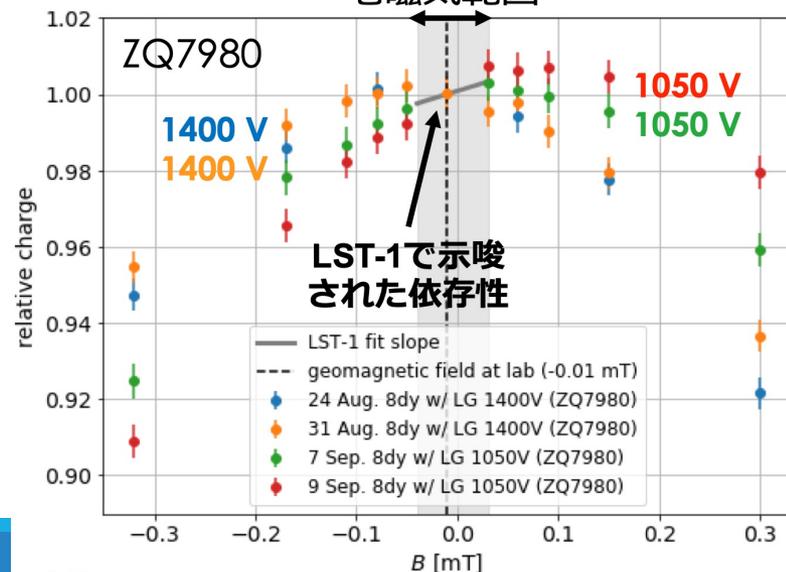


加える磁場強度に応じて平均出力電荷が変化する現象を確認した。



(2021年日本物理学会春季大会 小林)

LST1データの
地磁気範囲



(2021年日本物理学会秋季大会 小林)

本研究の目的と解決方策

<課題>

- 複数の光電子を発生させる光量で、出力電荷の磁場依存性は確認できたが、
 1. 複数の光電子を発生させる光量での測定では、Gainと収集効率を掛け合わせたものが出力される。
→「Gain」と「収集効率」の磁場依存性を評価できていない。
 2. LSTの観測結果と同じ印加電圧・評価方法(F-Factor法)で評価できていない。



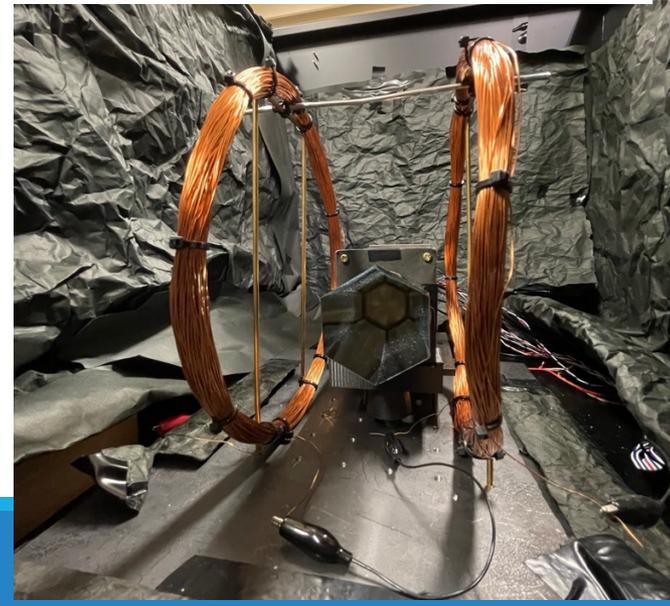
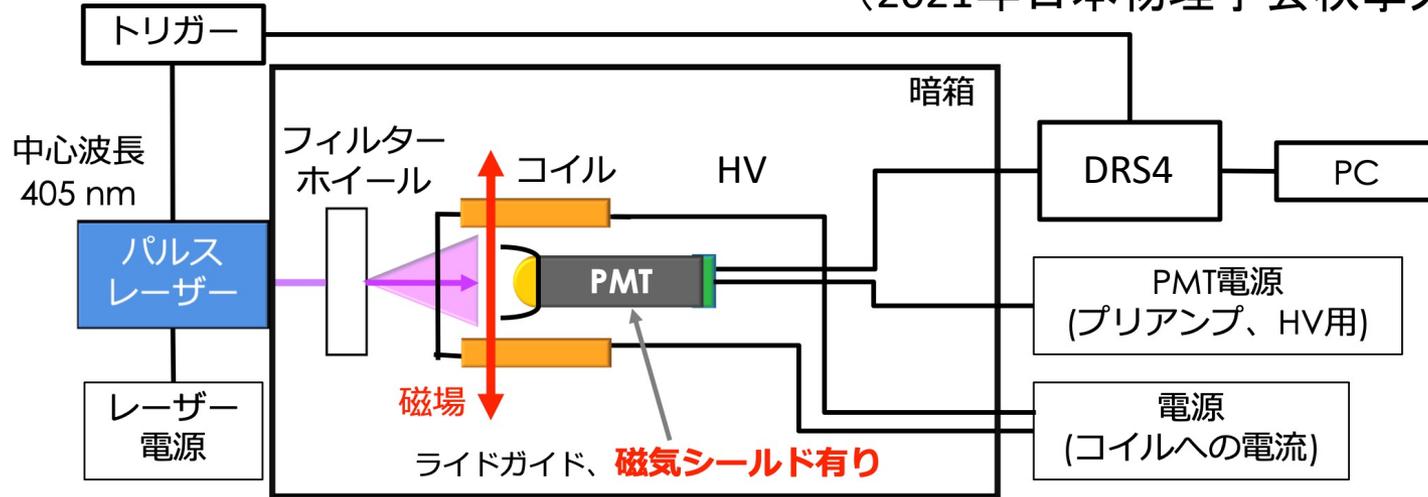
<本研究における解決方策>

1. PMTに1光子を照射して測定。
電荷分布の解析から、「Gain」と「収集効率」の磁場依存性を評価。
2. 複数の光電子を発生させる光量をPMTに照射。
同じ運用電圧・評価方法(F-Factor法)での測定を実施。

実験系のセットアップ

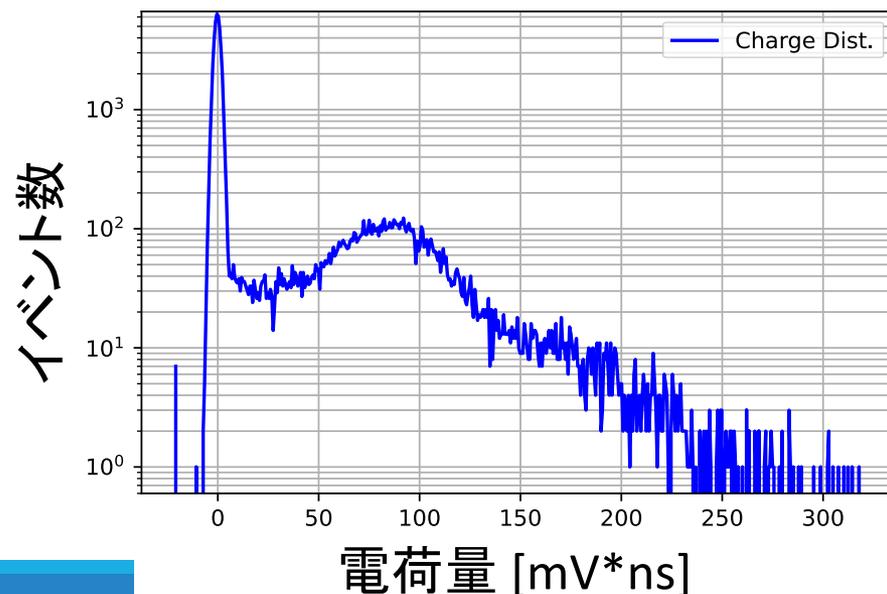
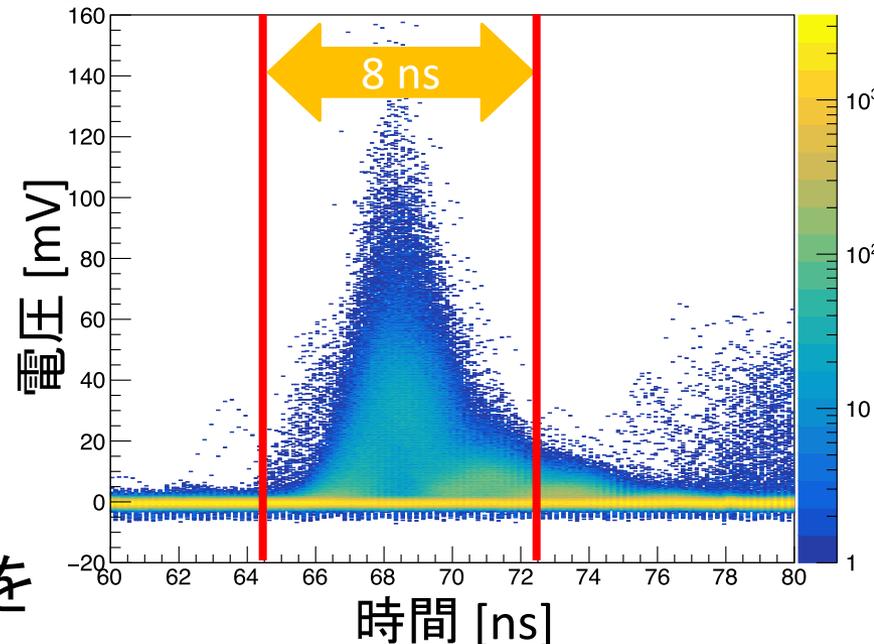
- PMTに対して磁場を加えながら光子を照射するため、下記のセットアップを構築。

(2021年日本物理学会秋季大会 小林)



実験1: 1光子イベントの解析・評価手法

- 高いSN比を実現するため、PMTには1500 Vを印加
- 各磁場強度で、5万回1光子を測定。
- 5万イベントの電荷分布からピーク値を求める。前後4 nsの波形を積分し、電荷量を算出する。
- イベント毎に算出された電荷量を用いて、各磁場強度毎にヒストグラムを作成する。



実験1: 1光子イベントの解析・評価手法

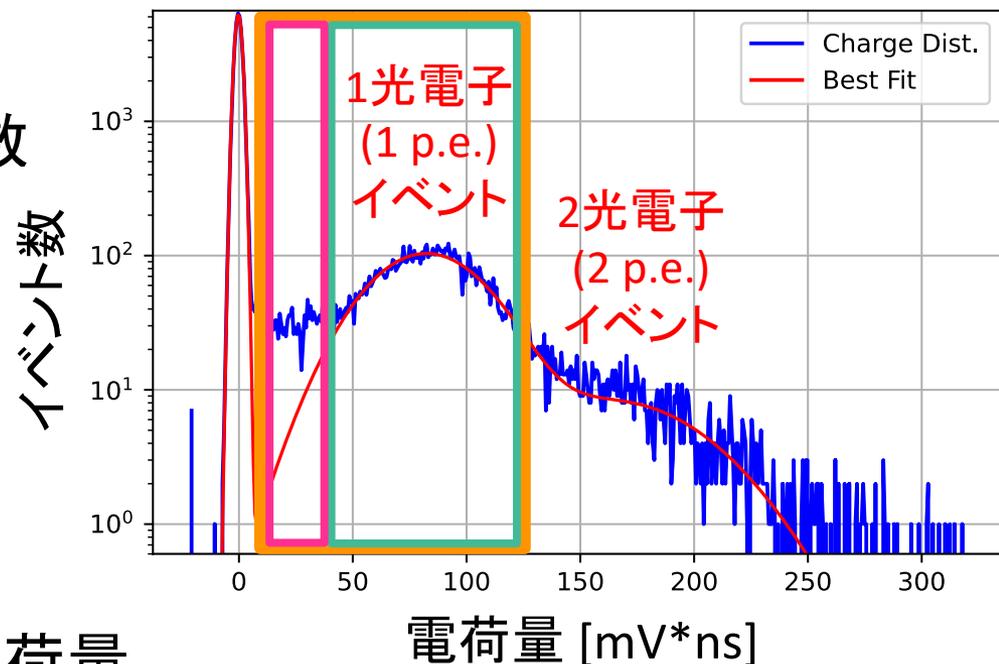
- 定量評価のため、得られた電荷分布をガウス関数でFittingする。

- 「Gain」と「収集効率」を以下のように定義し定量評価

- Gain:
1光子イベントのピークの電荷量

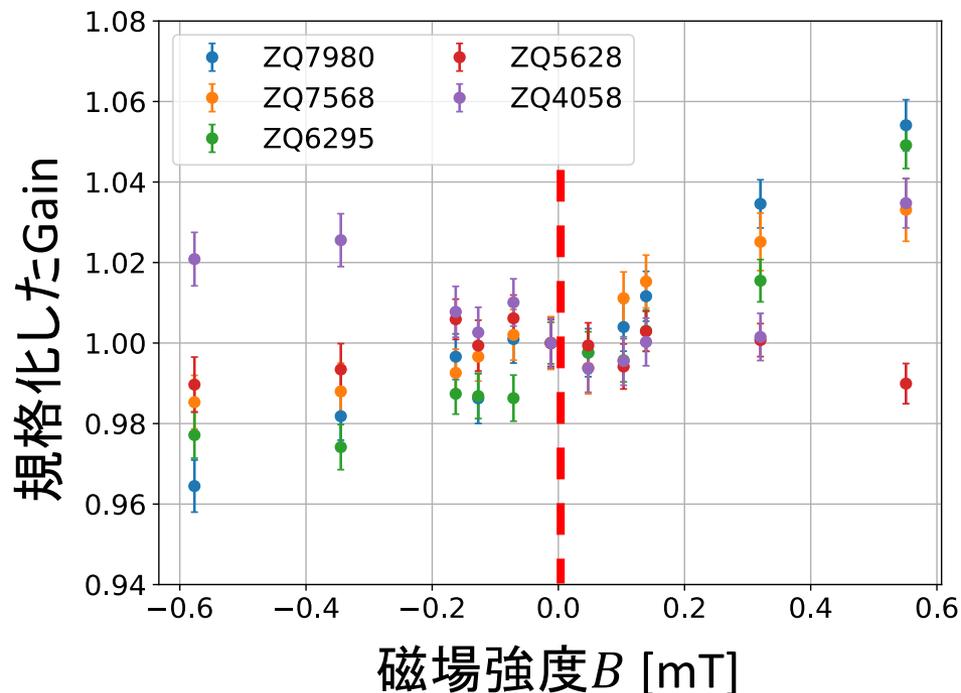
- 収集効率(CE):
全1光電子成分に占める準弾性散乱成分を取り除いた割合
全1光電子成分 : 0.15-1.5 p.e.の電荷を持つイベント
準弾性散乱成分: ノイズに含まれず1 p.e.イベントから超過したイベント (= 0.15-0.3 p.e.イベント)

$$CE \equiv (N_{0.15-1.5} - N_{0.15-0.3}) / N_{0.15-1.5}$$

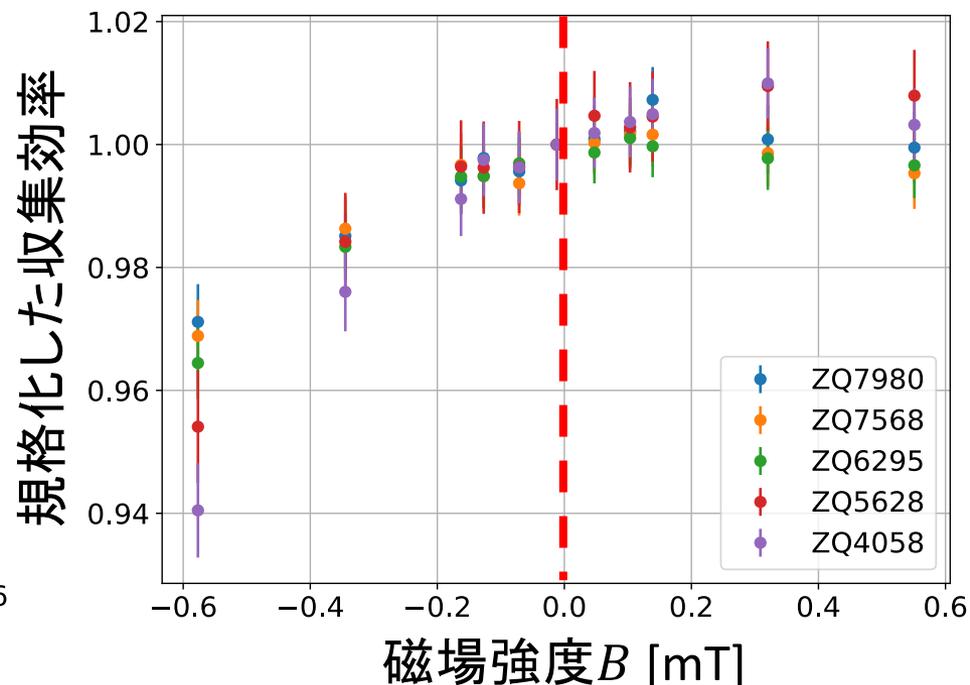


実験1: 1光子測定で得られたGain・収集効率の磁場依存性

Gainの磁場依存性



収集効率の磁場依存性

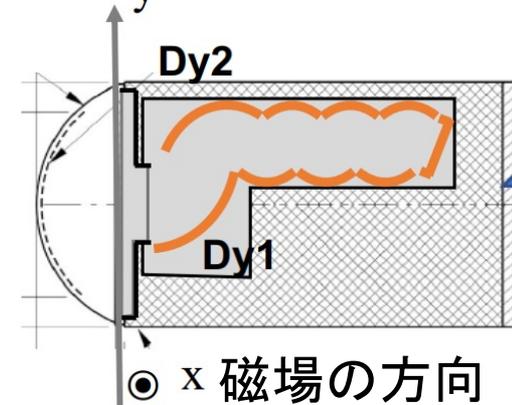


- ✓ 磁場を加えることで、Gain・収集効率が共に変動することを確認。
- ✓ GainはPMTのシリアル番号毎に異なる依存性を示す。
- ✓ 収集効率はGainよりPMT毎の個体差は小さい。
 $B = 0$ 前後で磁場に対する依存性が非対称に変化。

実験1: 1光子測定結果の考察

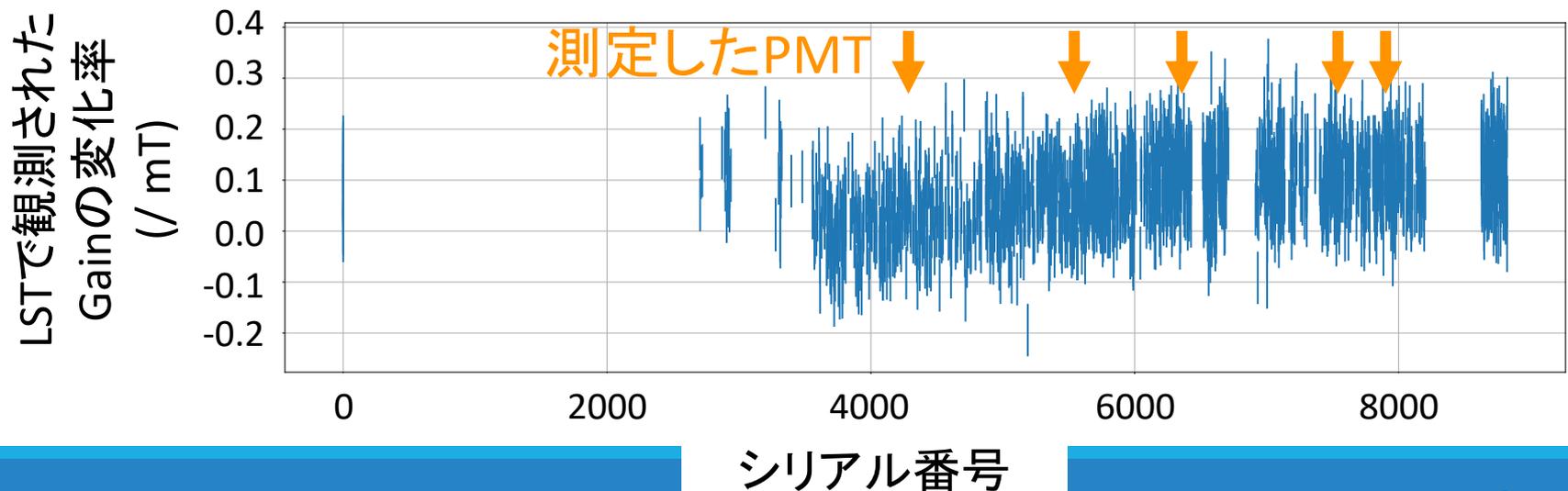
＜磁場によるGain・収集効率の変動について＞

- ローレンツカにより初段ダイノードに入射する位置の変化が原因と推測
- 収集効率の $B = 0$ 前後での非対称な変化は初段ダイノードの幾何学的構造に起因すると推測



＜シリアル番号毎でのGainの磁場依存性の差異＞

シリアル毎の差異については、LSTでもその傾向が観測されている



実験2: F-Factor法を用いたGainの算出方法

- ポアソン統計を用いて、得られたPMTの平均出力電荷(\bar{Q})とその分散(σ_Q^2)からPMTの平均光電子数(\bar{N}_p)を求める方法。過剰雑音係数 F は、1光子測定のGain (\bar{G})とGainの分散(σ_G)から算出

$$\bar{N}_p = \frac{\bar{Q}^2}{\sigma_Q^2} \left(1 + \frac{\sigma_G^2}{\bar{G}^2} \right) = \frac{\bar{Q}^2}{\sigma_Q^2} F^2$$

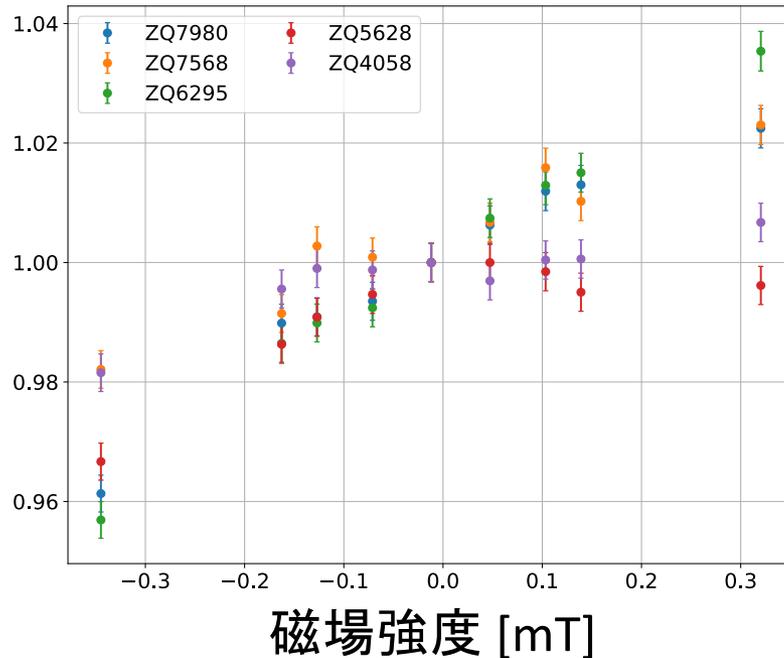
- 算出された \bar{N}_p を用いて、Gain (G) を以下の式から算出する。

$$\text{平均出力電荷} = \text{Gain} \times \text{平均光電子数} \Rightarrow G = \frac{\bar{Q}}{\bar{N}_p}$$

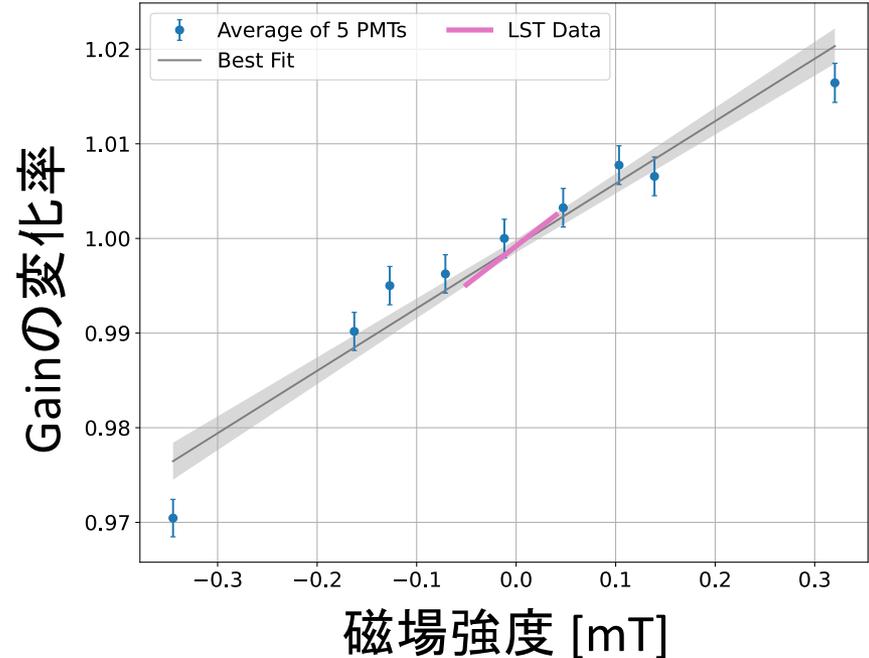
- 本研究では、LSTの測定結果との比較のため、
 - ▶ PMTに運用電圧(1030-1080 V)を印加
 - ▶ 複数の光電子を発生させる光量を照射
 - ▶ 各PMTで20万回光を照射。 $F^2 = 1.22$ を用いてGainを算出。

実験2: F-Factor法を用いたGainの測定結果

Gain vs 加えた磁場強度



PMT5本の平均



- PMTのシリアル毎に磁場に対するGainの応答が変化することを確認
- 5本のPMTの平均を取ってFitting
→Gainの変化率: $6.6 \pm 0.4 \text{ \%}/\text{mT}$ (誤差は統計誤差のみで 1σ)
- LSTの変動を磁場由来と解釈した場合の変化率: $8.2 \pm 0.2 \text{ \%}/\text{mT}$
→LSTで観測されたGainの変化の大部分は磁場由来である事を示唆

まとめ

- 大口径望遠鏡(LST)の較正試験中に発見した、**微細な検出器応答の地磁気由来と思われる依存性**を、PMTに磁場を印加することで検証
- PMTに1光子を照射する測定により、PMTの「**Gain**」と「**収集効率**」が**磁場の強度により変動**することを確認。
→光電子がローレンツ力によって軌道が変化することが原因と推測
→磁場に対する非対称な変動は、
 ダイノードの非対称な幾何学構造に由来すると推測。
- PMTに複数の光電子を発生させる光量を照射し、F-Factor法を用いることで、Gainの変化率が $6.6 \pm 0.4 \text{ \% / mT}$ と推定。
→LSTで観測された**Gainの変化の大部分は磁場由来**である事を示唆