

AXEL実験： 光ファイバーアイソレーションによる 高電位PMT信号の読み出し

榎野幸将

市川温子^A, 中村輝石^A, 小原脩平^B, 潘晟^C, 中村和広, 吉田将, 菅島文悟, 岩下芳久
他AXEL collaboration

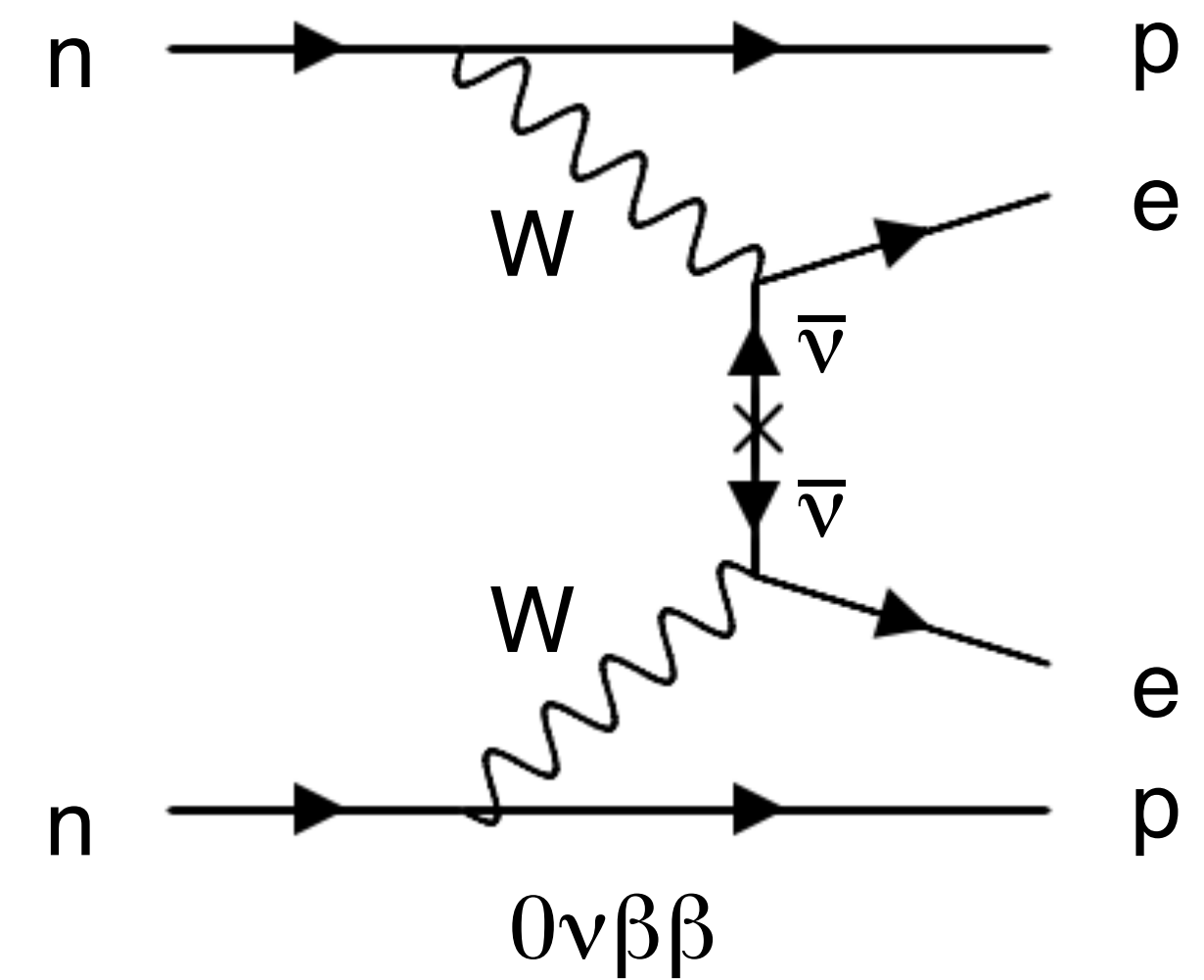
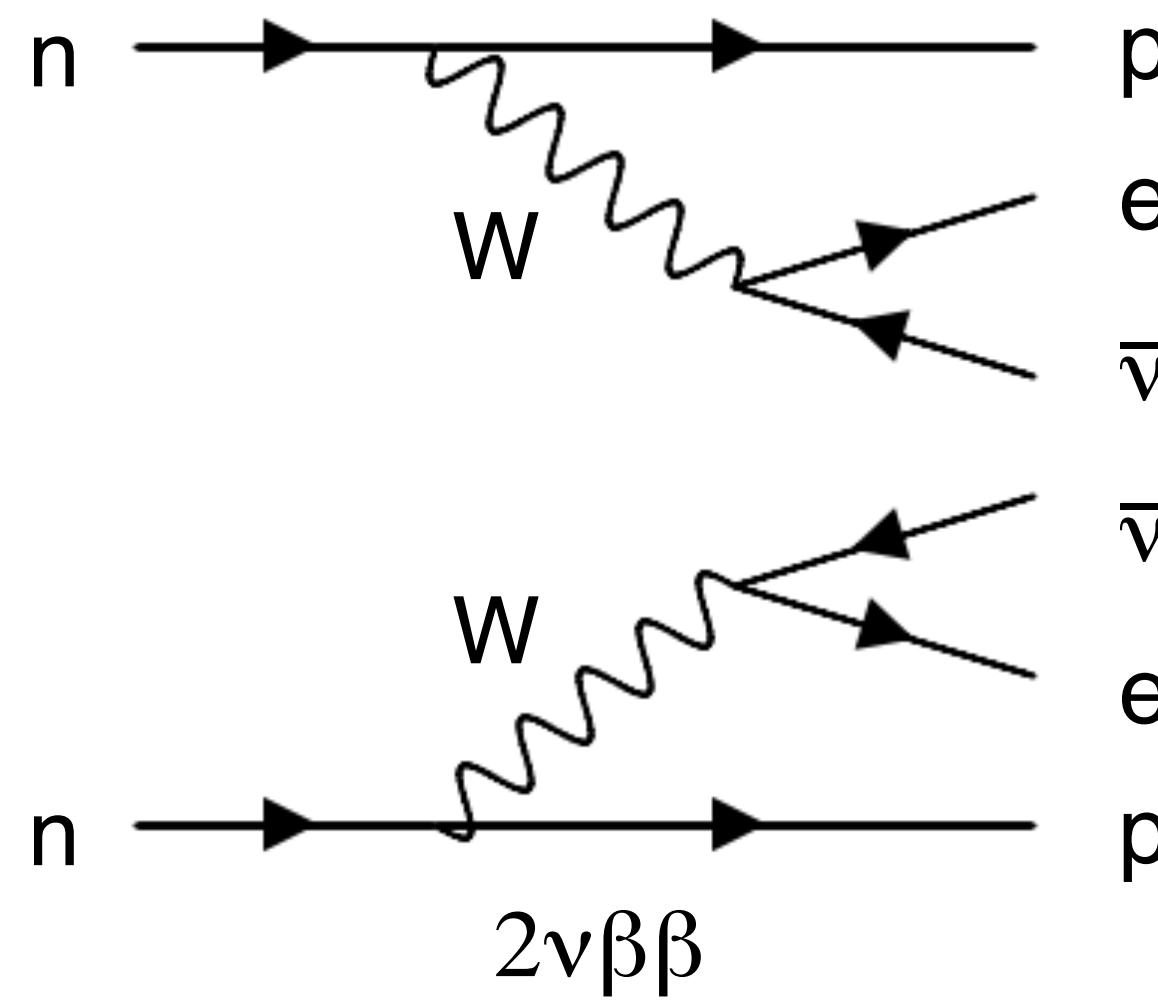
京大理, 東北大理^A, 東北大FRIS^B, 東大ICEPP^C

2021/09/16

ニュートリノレス二重 β 崩壊($0\nu\beta\beta$)

ニュートリノがマヨラナ粒子ならば

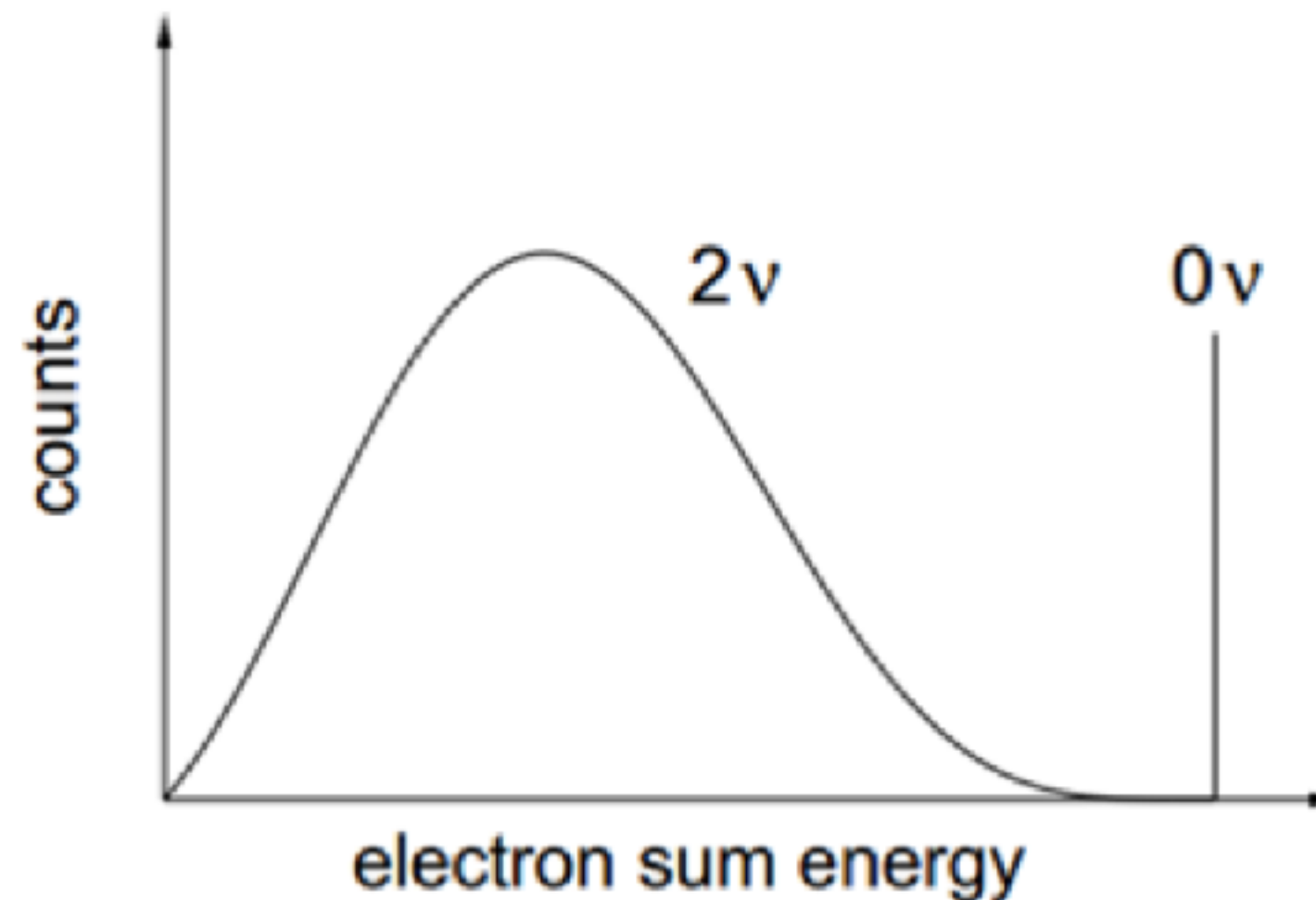
- 物質優勢宇宙の起源
- ニュートリノ質量が軽い理由



$0\nu\beta\beta$ を観測するために

低バックグラウンド

高エネルギー分解能が必要



^{136}Xe の場合
半減期の下限値
 1.07×10^{26} year^[1]

[1]A. Gando, et al. phys. Rev. Lett., Vol. 117, p. 082503, Aug2016

AXEL実験

大質量

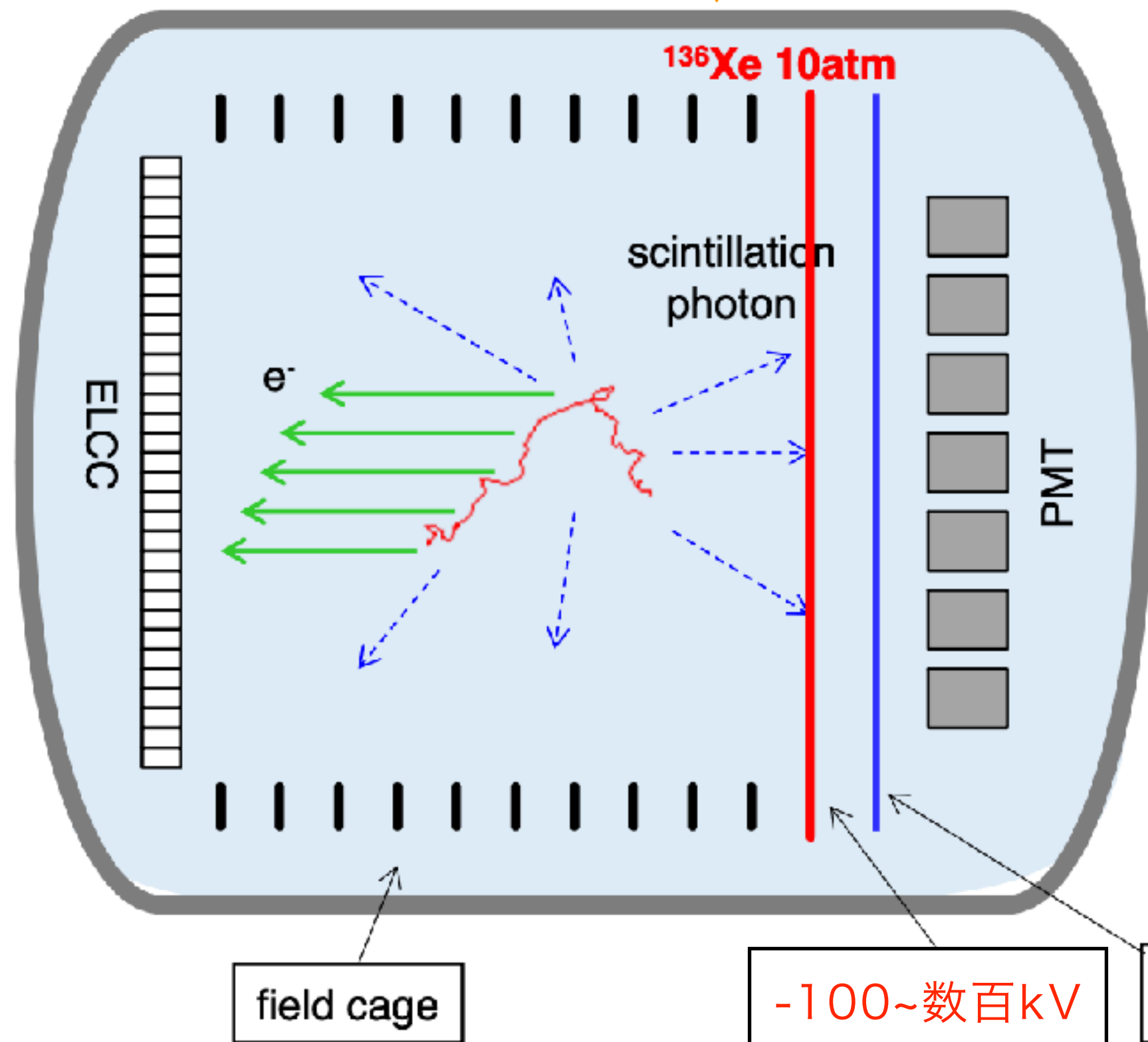
高圧キセノンガスTPC

高エネルギー分解能

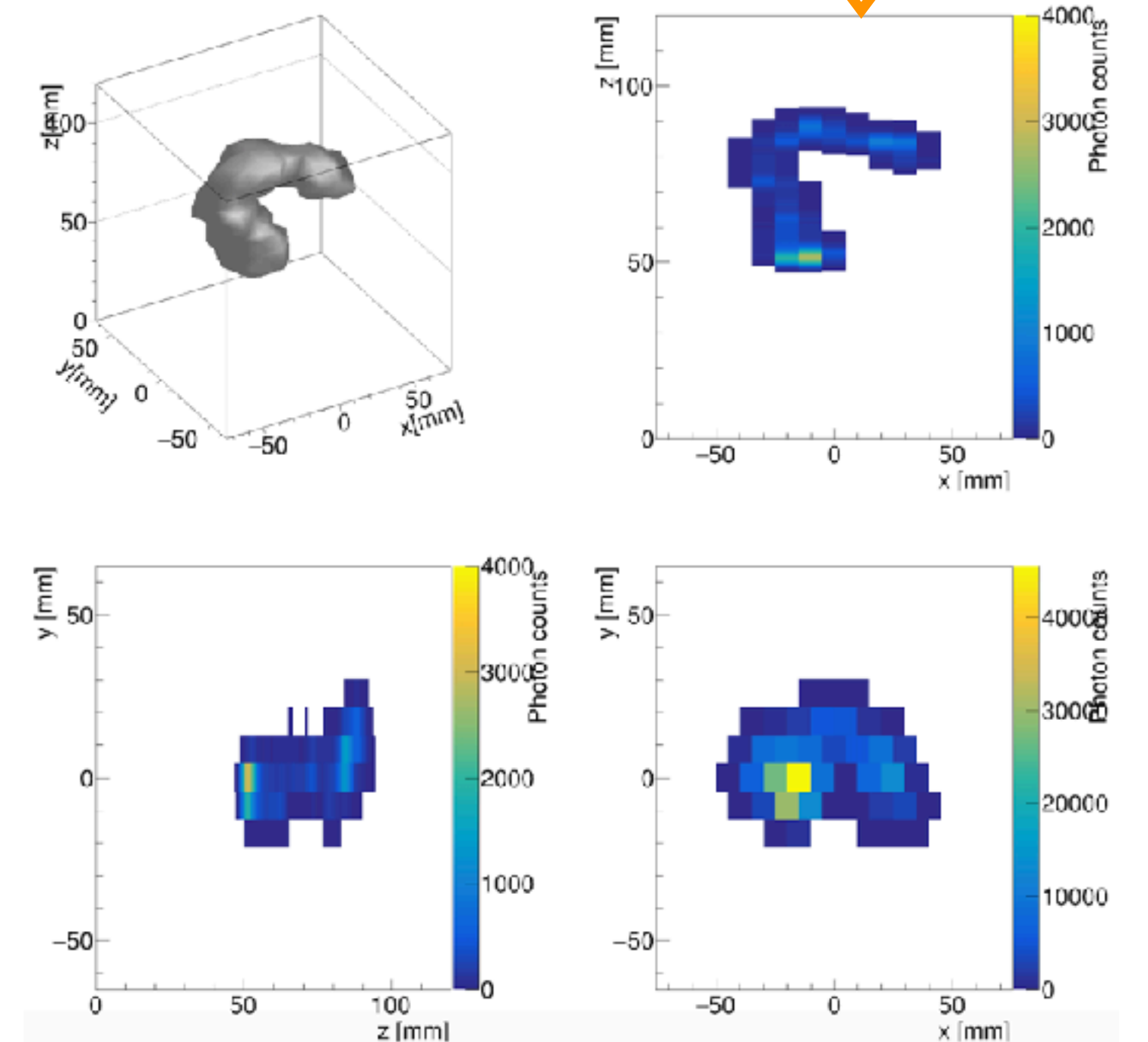
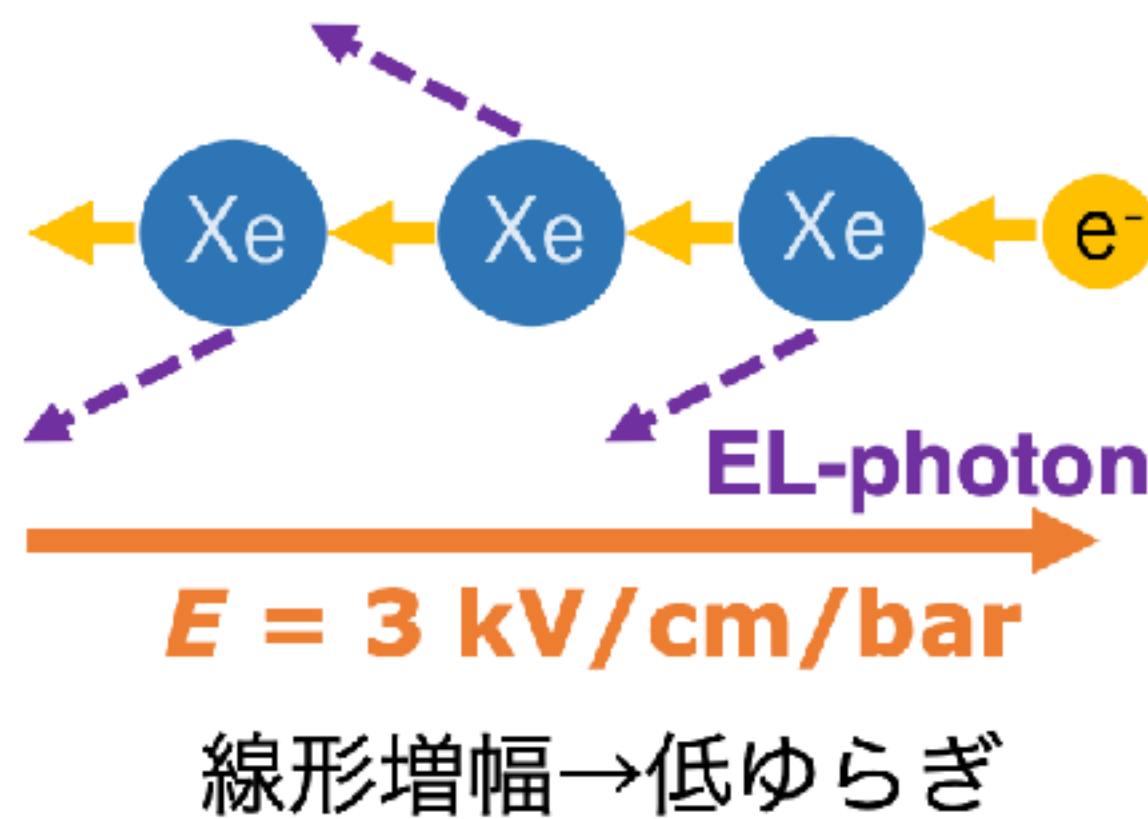
Electroluminescence過程

低バックグラウンド

三次元飛跡再構成が可能



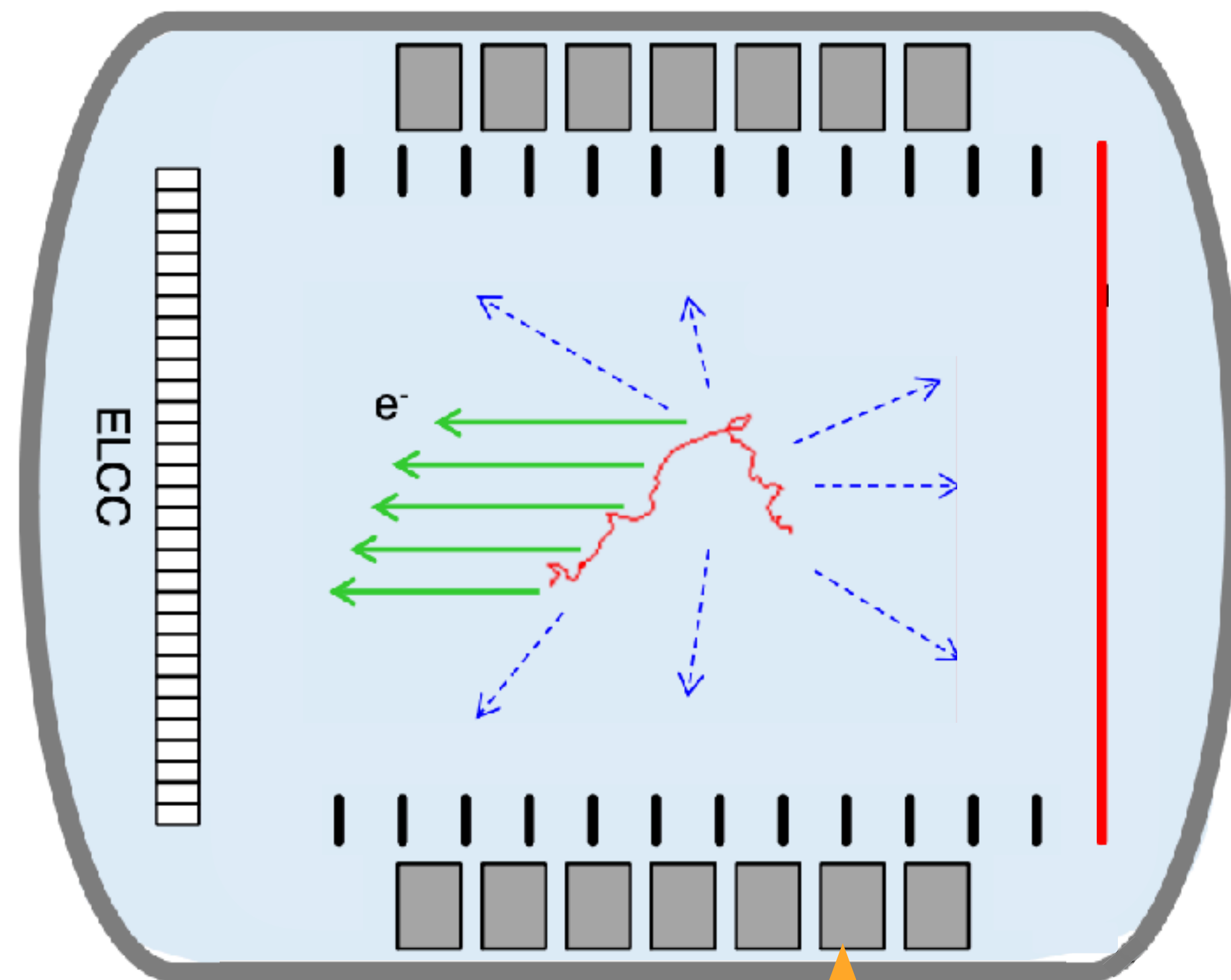
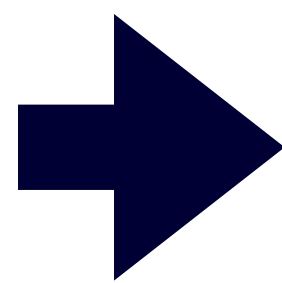
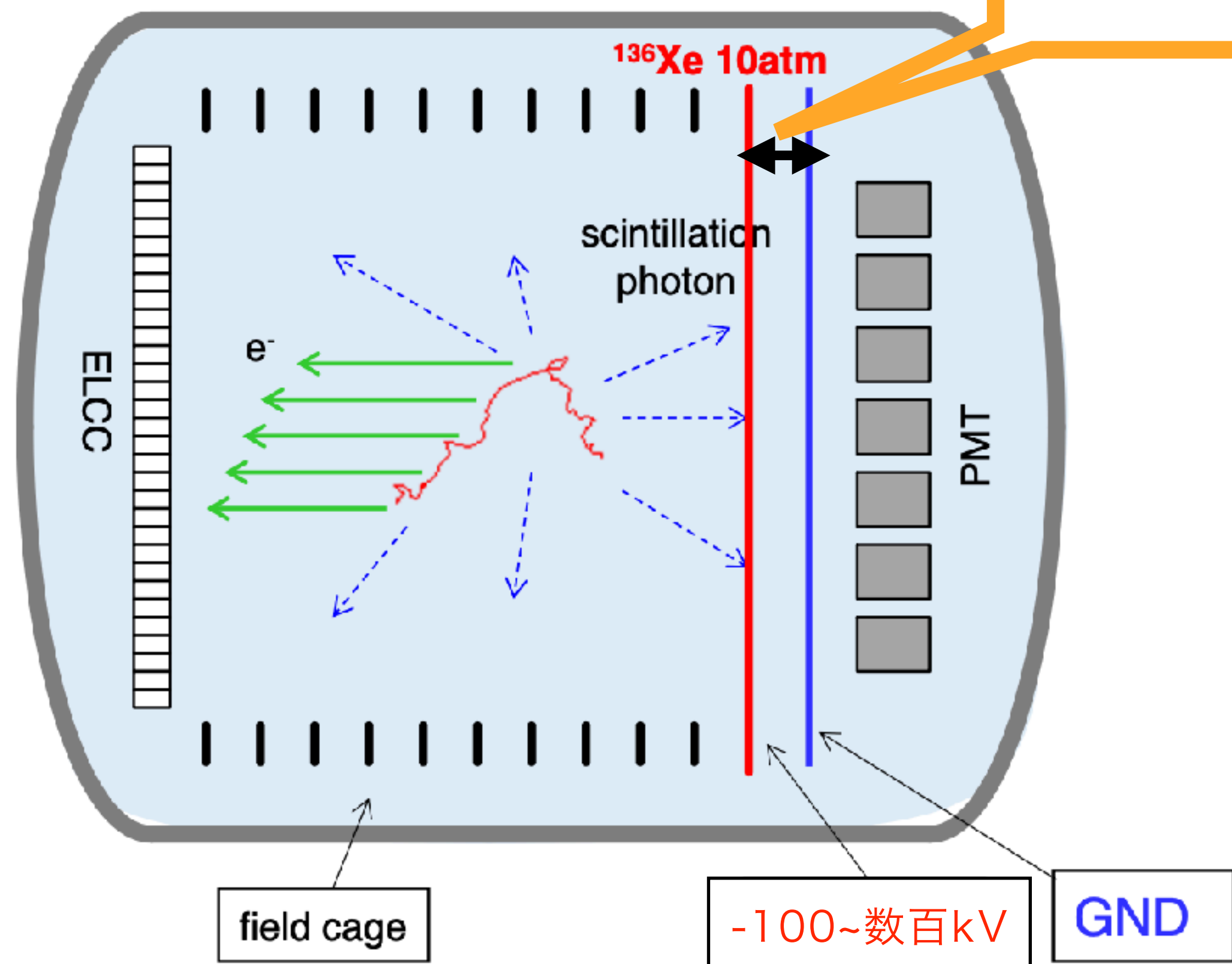
EL過程



γ 線(662 keV)の飛跡

検出器のアップデート

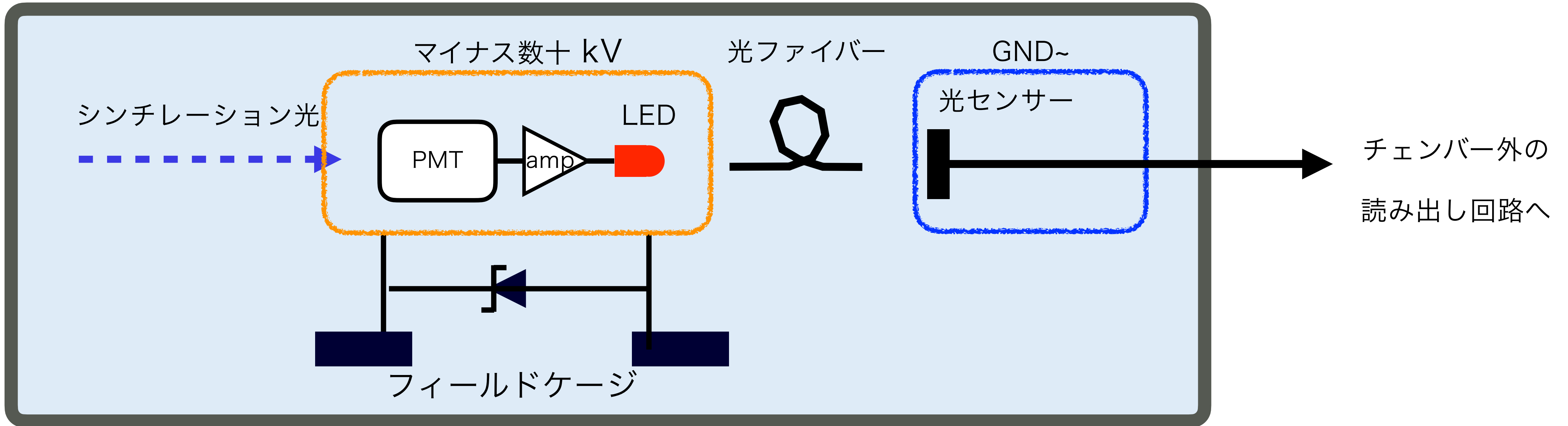
十分に離す必要がある



フィールドケージの
電位でPMTを運用

- 有効体積の拡張
- シンチレーション光の検出効率向上
- PMTの電位が浮いてしまうので直接読み出すことができない

光ファイバーアイソレーション



- シンチレーション光をPMTで捉え、再度光に変換した後、光センサーで読み出す
- フィールドケージの電位をPMTの電源とする
- 光ファイバーで電位を切り離すことでGND電位での読み出しが可能

LEDに必要な電流の見積もり

- LED電流： I_{LED}
- ファイバーへの光の捕獲効率： ϵ_f
- 光センサーの検出率： $\epsilon_{QE} \sim 0.3$
- 光センサーのゲイン： $g \sim 10^5$

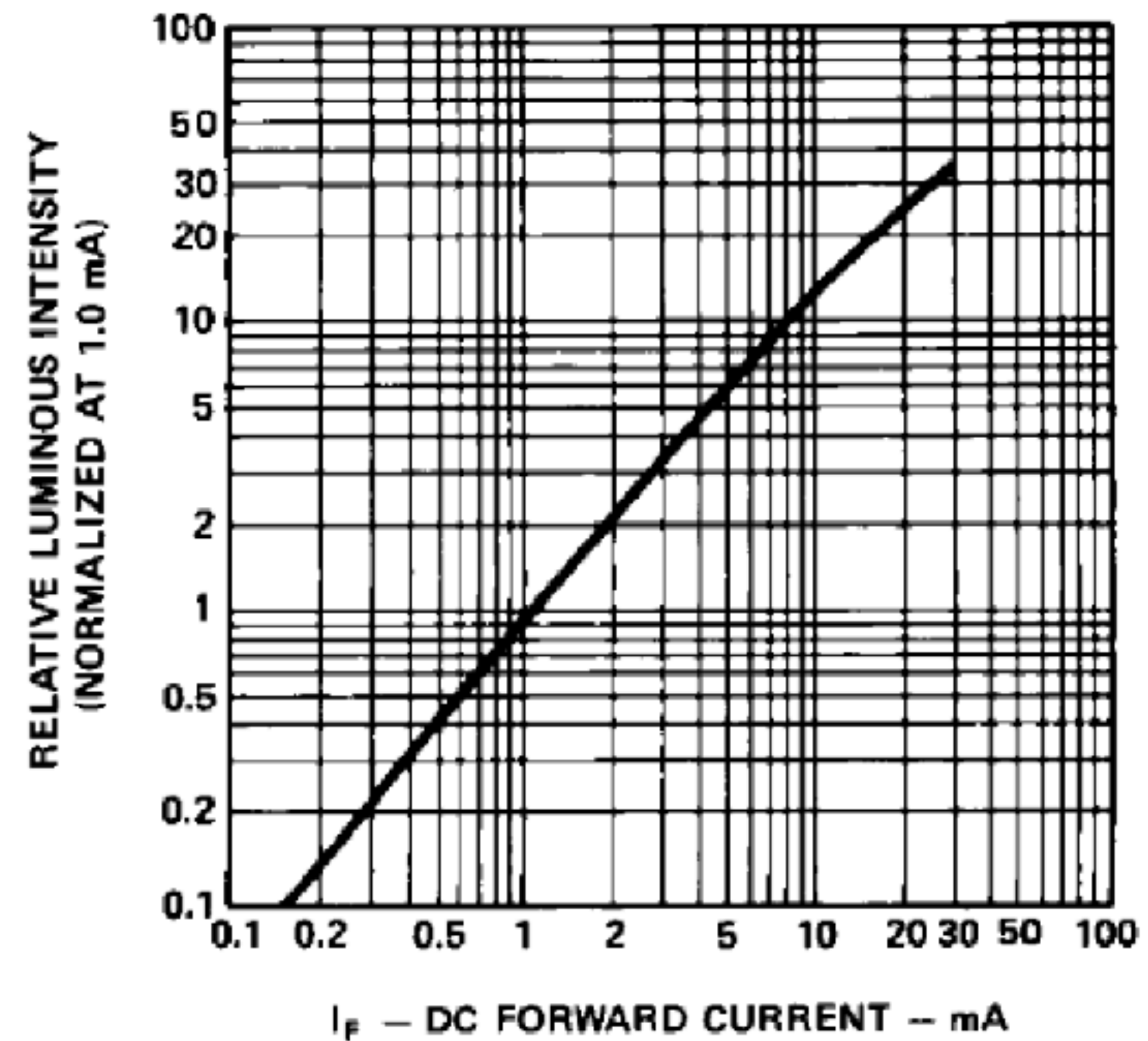
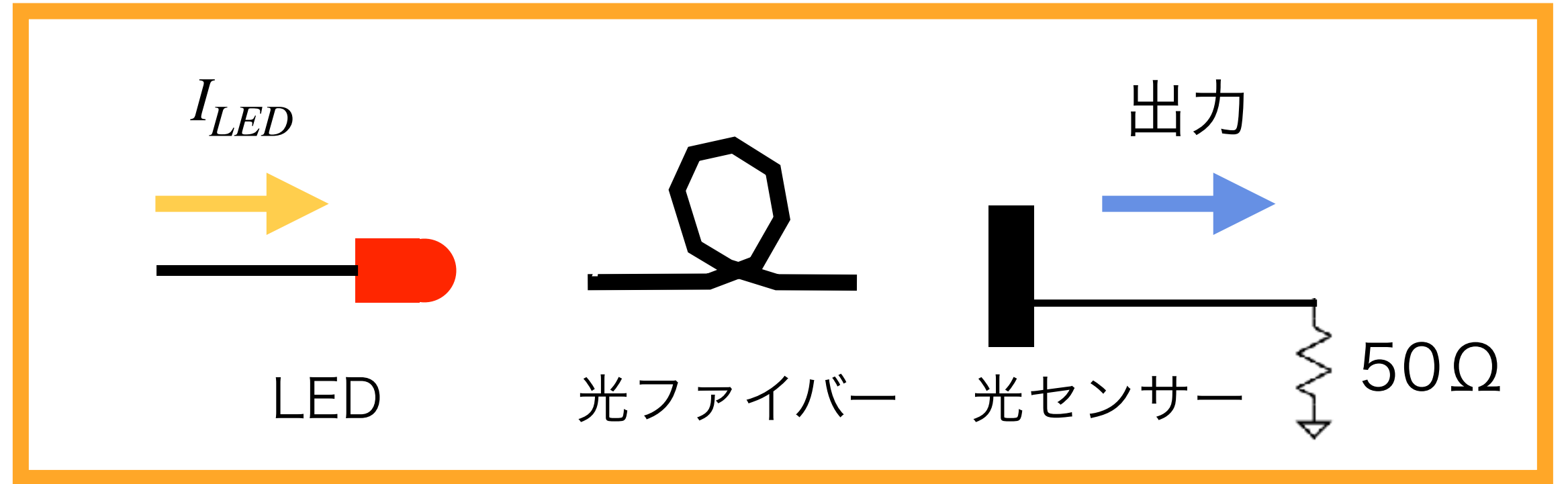
(LEDの光量) \propto (LED電流)であり、 $\epsilon_f \sim 0.1$ とすると

50 Ω で読み出したときの光センサー出力の概算は

$$50\epsilon_f\epsilon_{QE}gI_{LED} \sim 1.5 \times 10^5 \times I_{LED} [V]$$

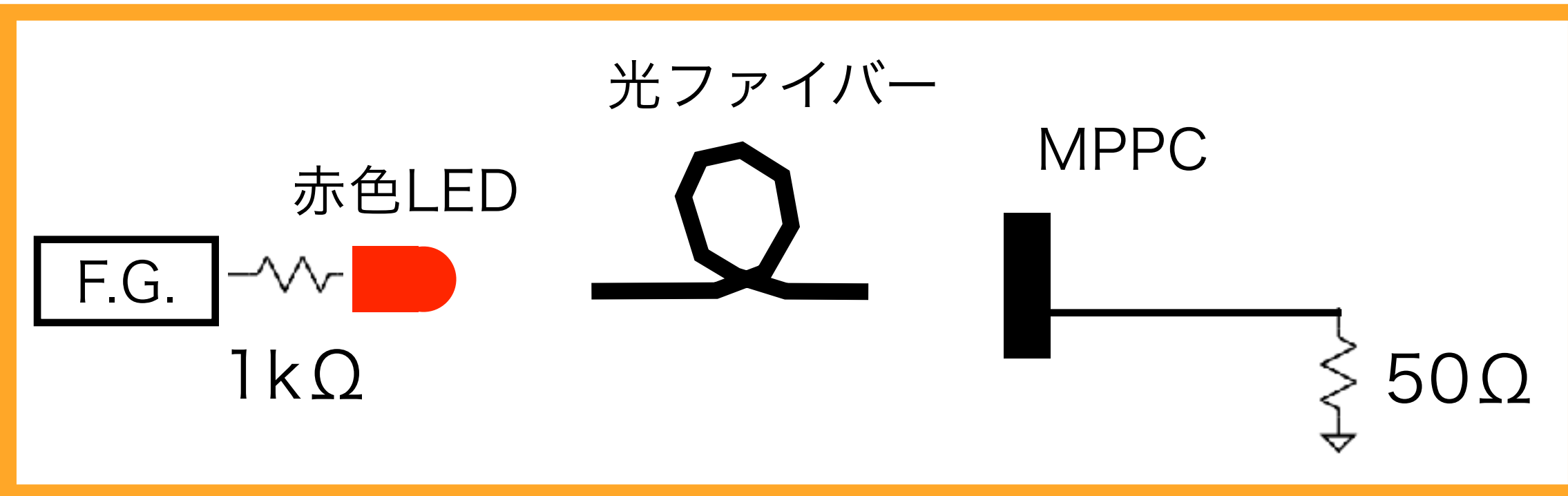
$I_{LED} = 1 [\mu A]$ ならば、光センサー出力は150[mV]

→実現性がある

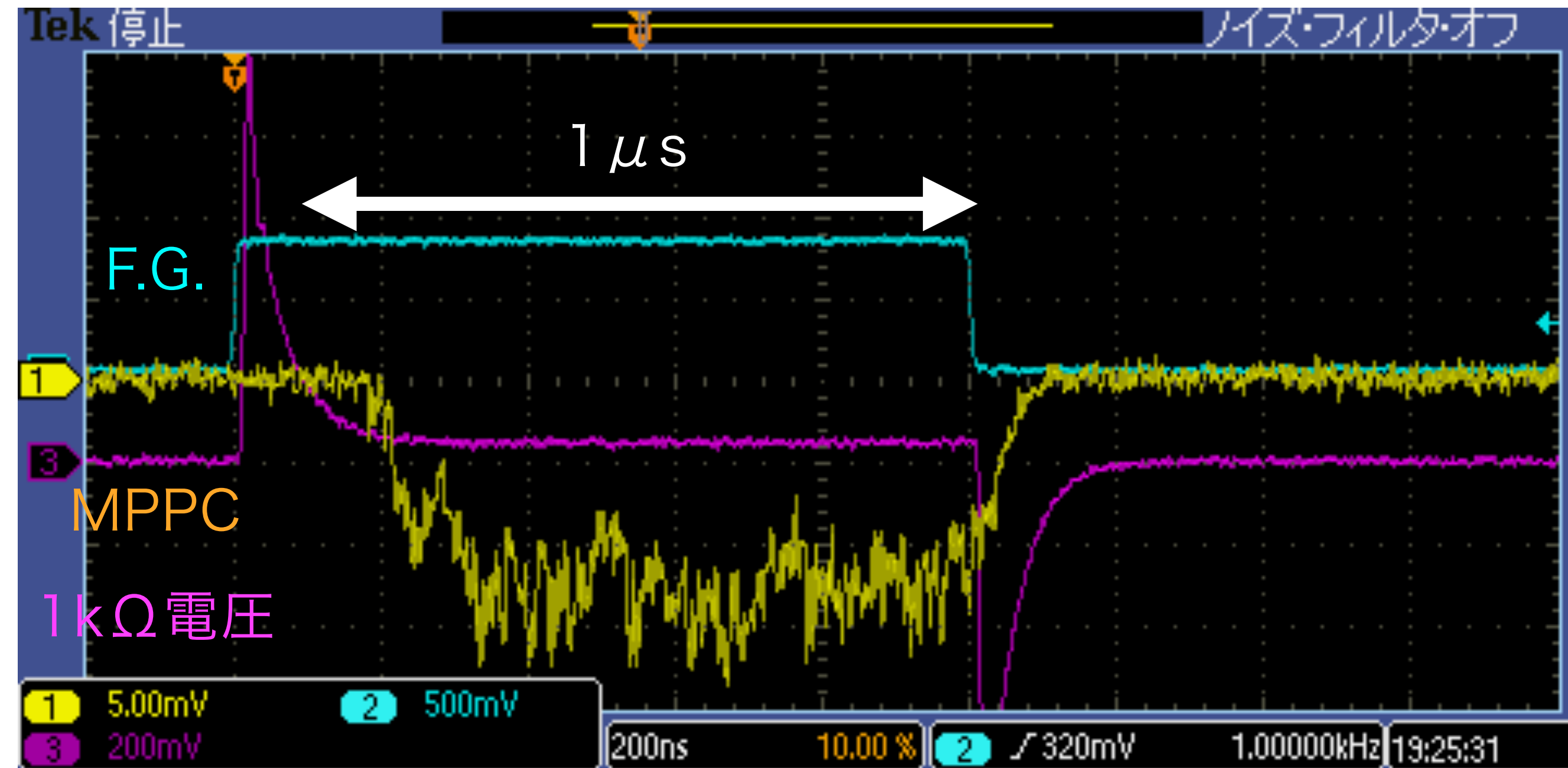


赤色LED(HLMP-K150)の電流 vs. 光強度

LEDに必要な電流の測定



- F.G.でLEDに10 kHzのパルス波を入力し、光センサーでLED光を捉えるのに必要なLED電流を測定
- F.G.の入力電圧が1.54Vのとき、MPPCでパルス波と同期した信号が測定できた
- このときのLED電流 $\sim 100\mu\text{A}$, 幅 $\sim 100\text{ns}$



→PMTの1photo信号 $\sim 100\mu\text{A}$, 幅 $\sim 10\text{ns}$ なのでMPPCで読み出すには、PMT信号を増幅する必要がある

回路設計

PMT信号を増幅し、LEDを発光させる回路の設計

✓ フィールドケージへの負荷を軽減するために低電流回路 ($50\mu\text{A}$)

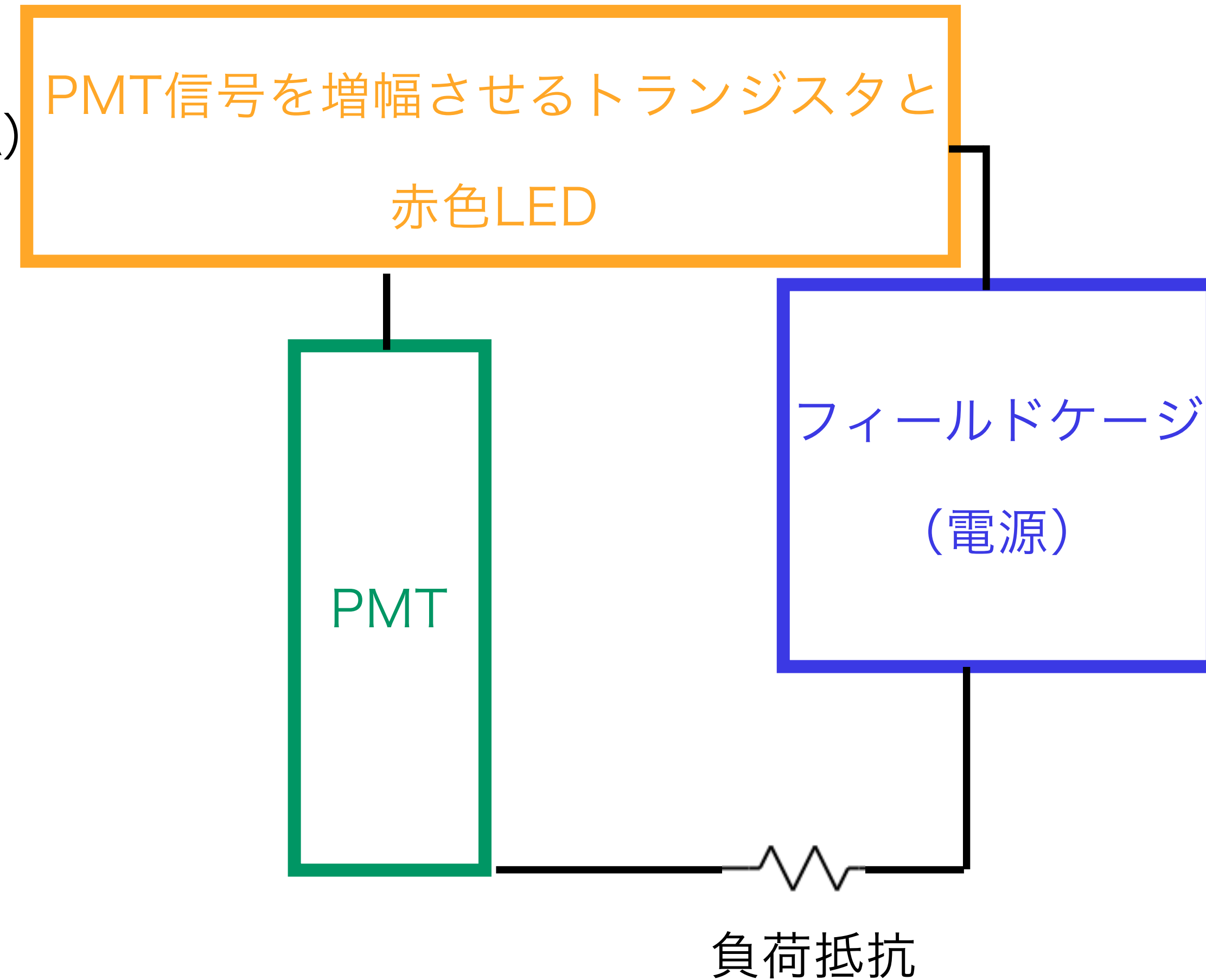
→ PMTのブリーダー抵抗を $3\text{M}\Omega$ から $90\text{M}\Omega$ にし、
回路に負荷抵抗 $3\text{M}\Omega$ を加える

✓ PMTの電源電圧を安定供給

→ ツェナーダイオードで定電圧化

✓ PMT信号でLEDを発光させたい

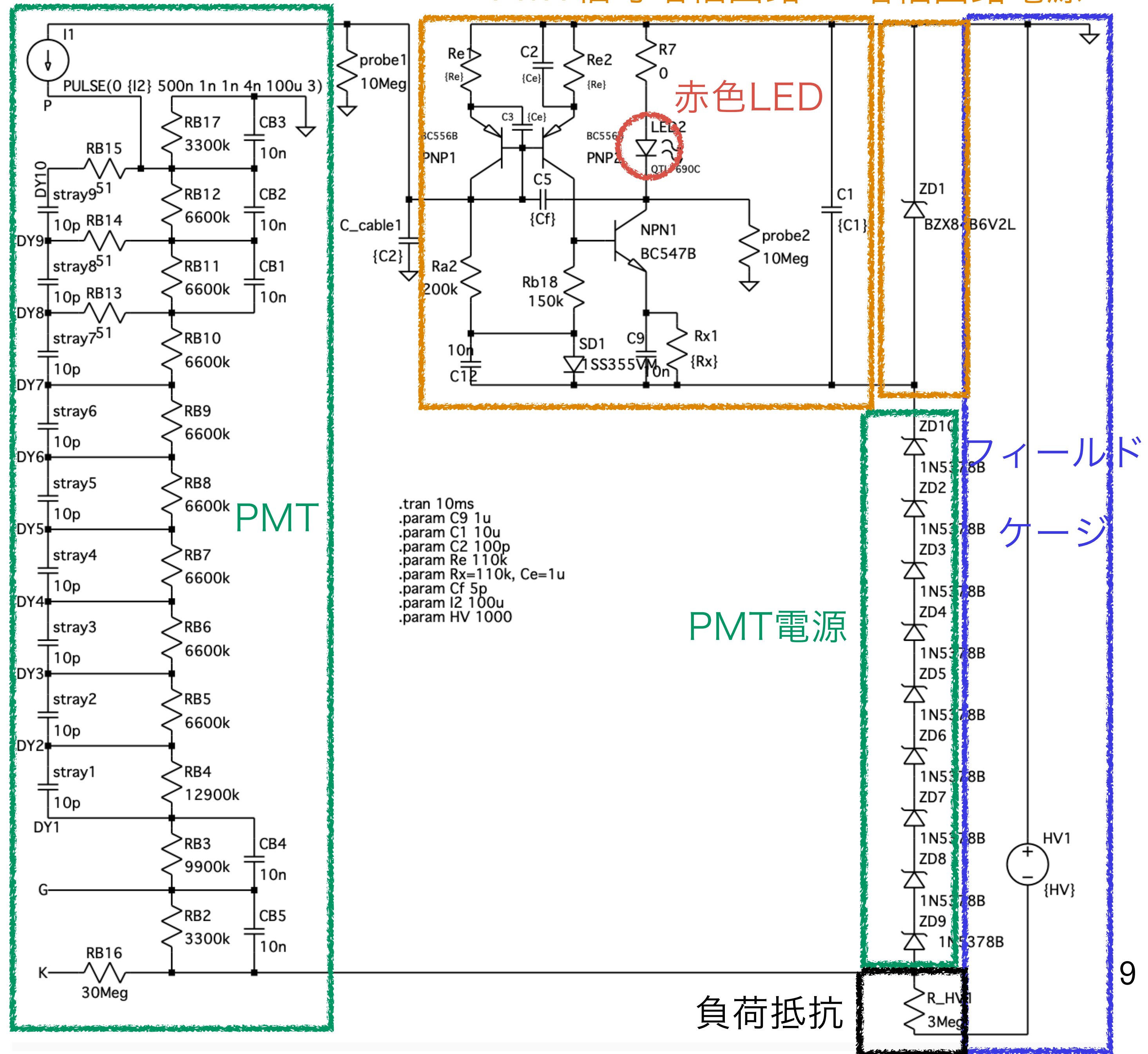
→ トランジスタでPMT信号を増幅



回路シミュレーション

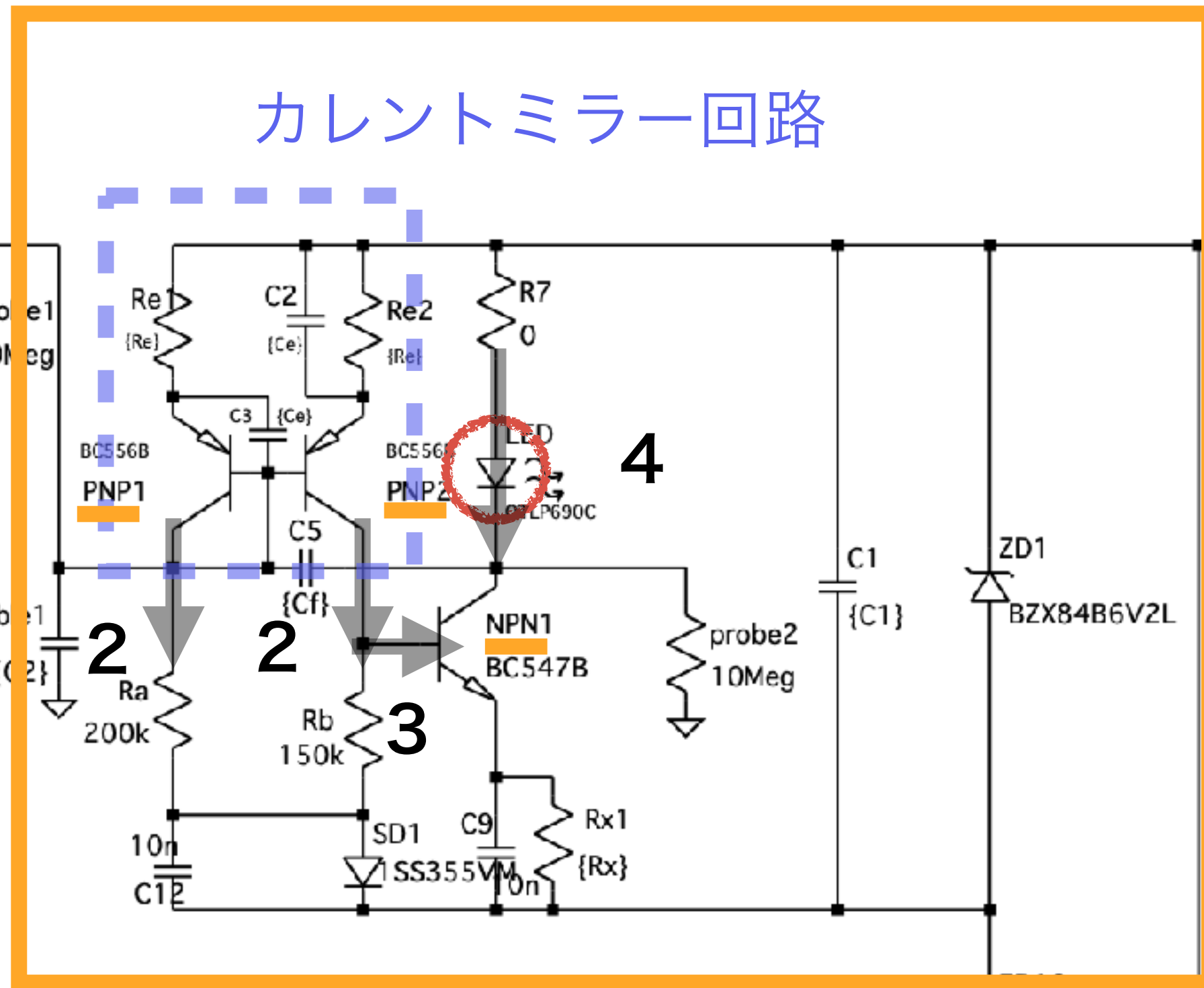
LTspiceを用いたシミュレーション

- ✓ 低電流回路(50 μ A)
- ✓ PMTの電源電圧を安定供給
- ✓ PMT信号でLEDが発光



PMT信号の増幅原理

1. PMT信号
2. PNP1とPNP2のカレントミラー回路
PNP1の電流がPNP2で再現される
3. PNP2からの電流がNPN1のベース電流となる
4. NPN1で電流を増幅し、LEDを駆動



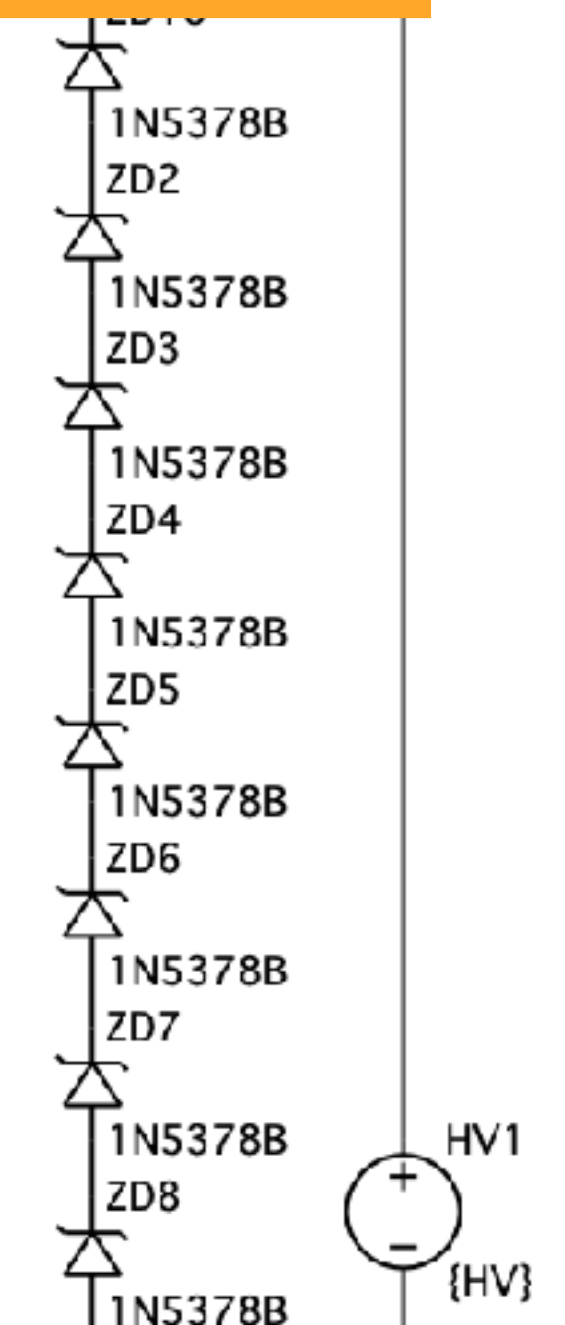
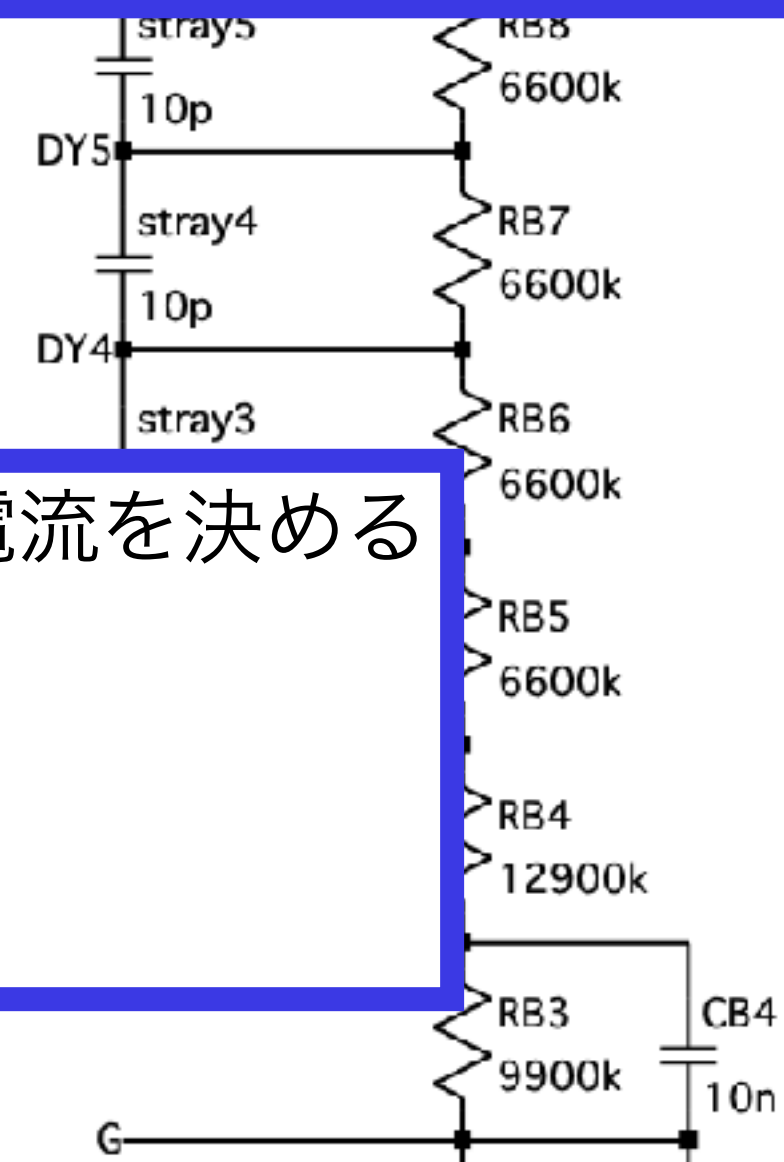
PMT信号増幅回路

```
.tran 10ms
.param C9 1u
.param C1 10u
.param C2 100p
.param Re 110k
.step param Rx list 110k 220k 300k
.param Ce=1u
.param Cf 5p
.param I2 100u
.param HV 1000
```

Ra, Rb, Re, Rx : ゲイン、バイアス電流を決める

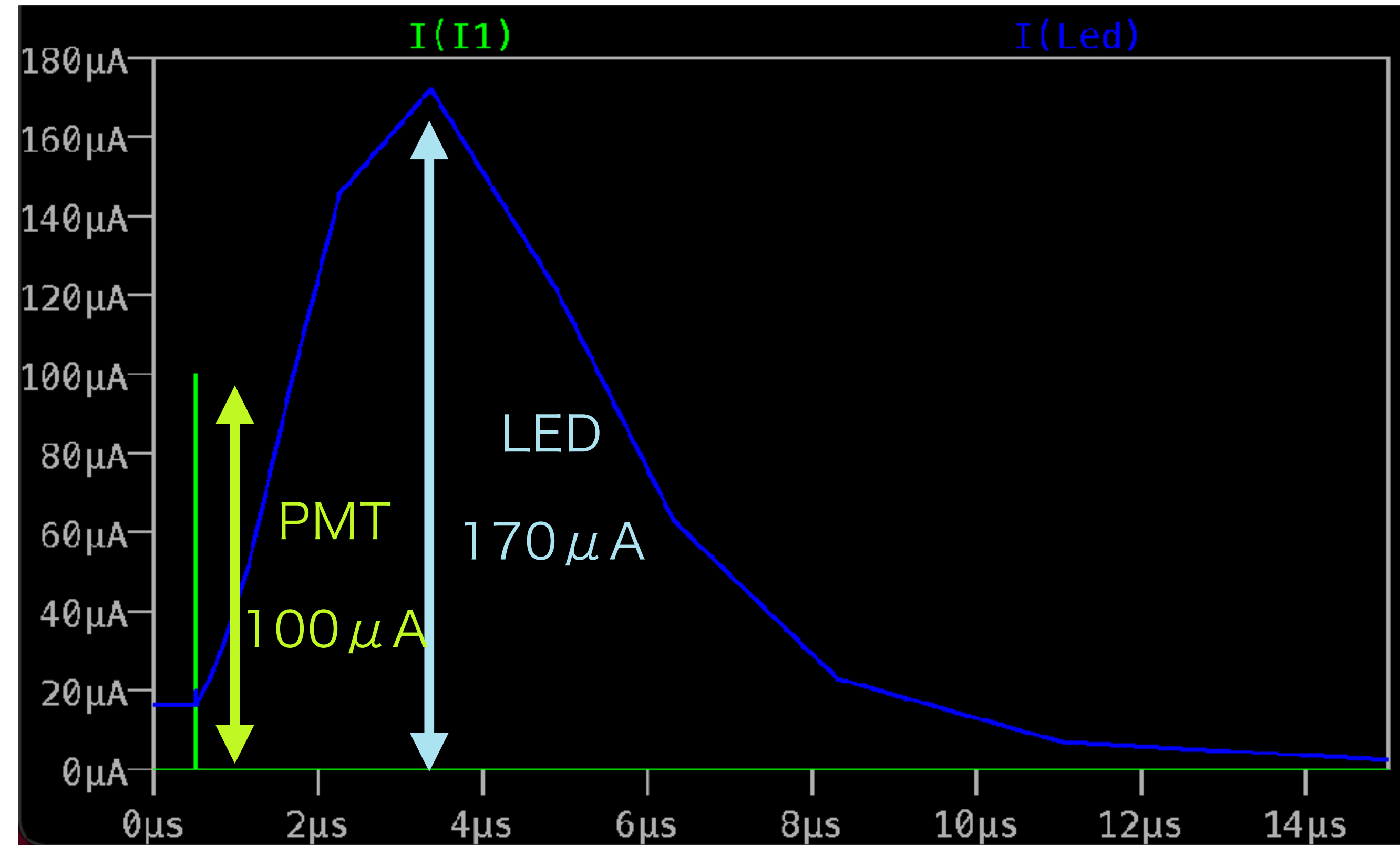
Rx, C1 : 増幅回路の回復時間

C5 : 浮遊容量

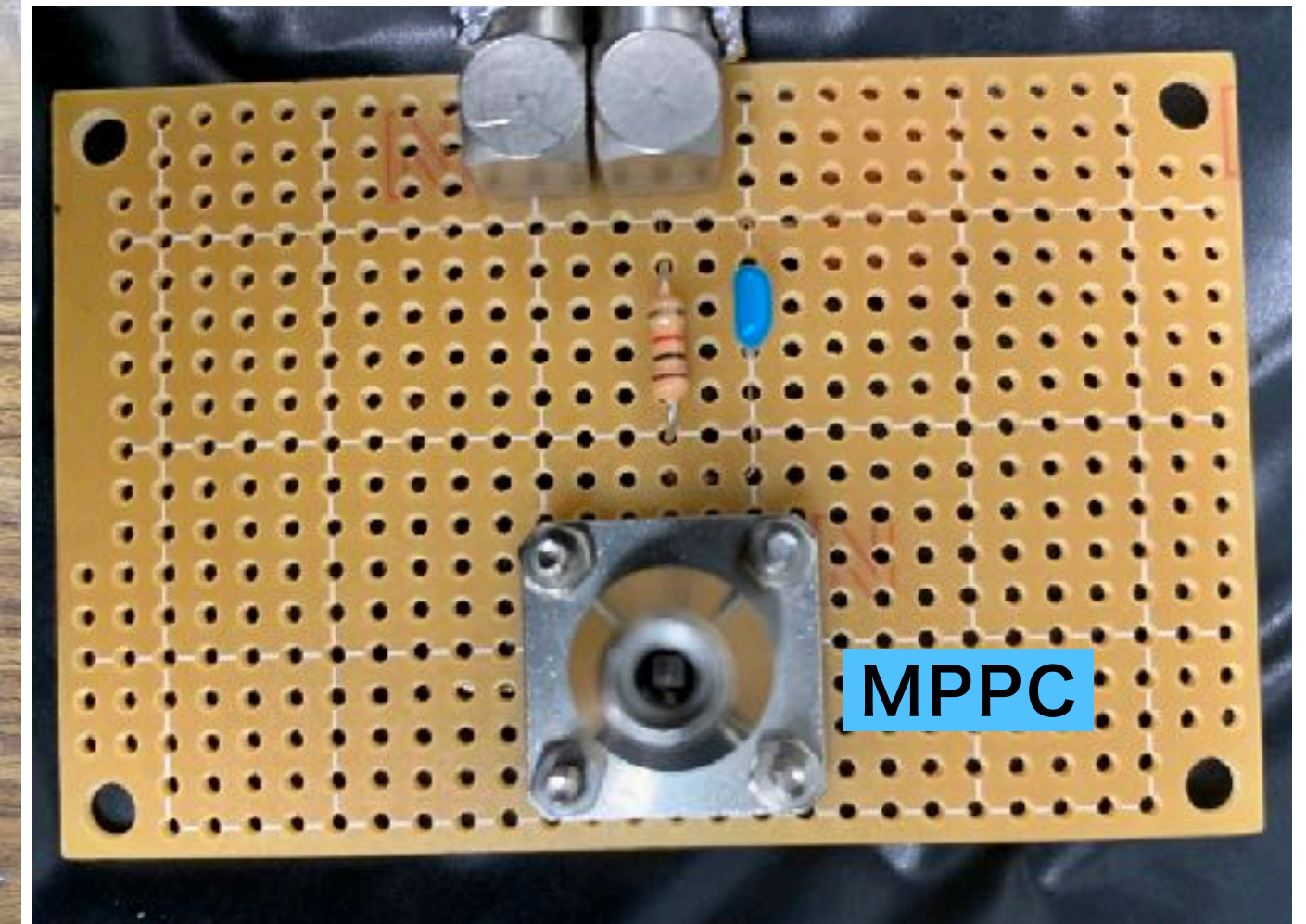
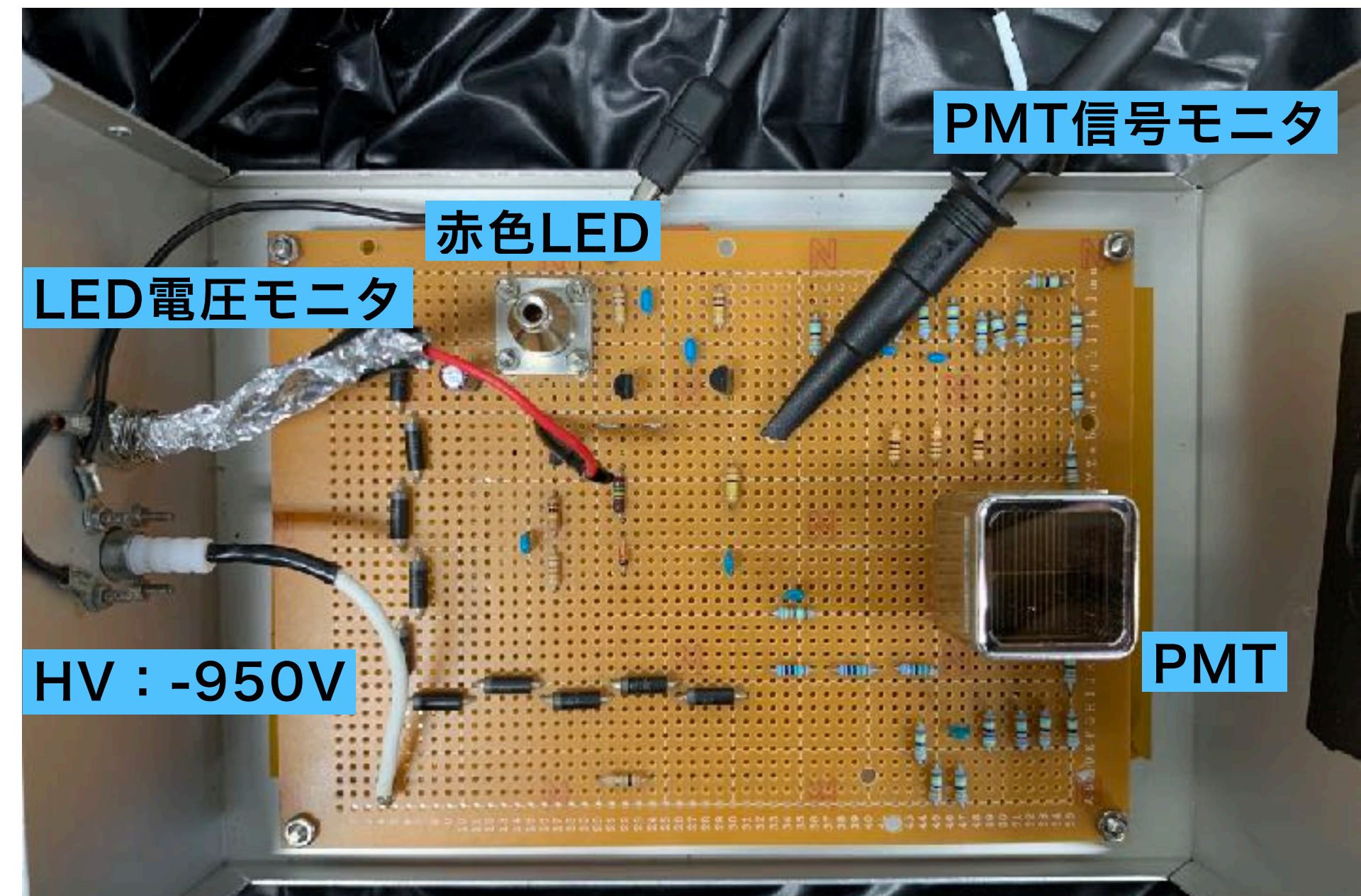


シミュレーション結果

- PMT信号（緑）とLED電流（青）の比較
- PMT信号を模した $100\mu\text{s}$ 周期のパルスを入力した
- LEDに必要な出力($100\mu\text{A}$)を十分満たしている



実機での試験セットアップ



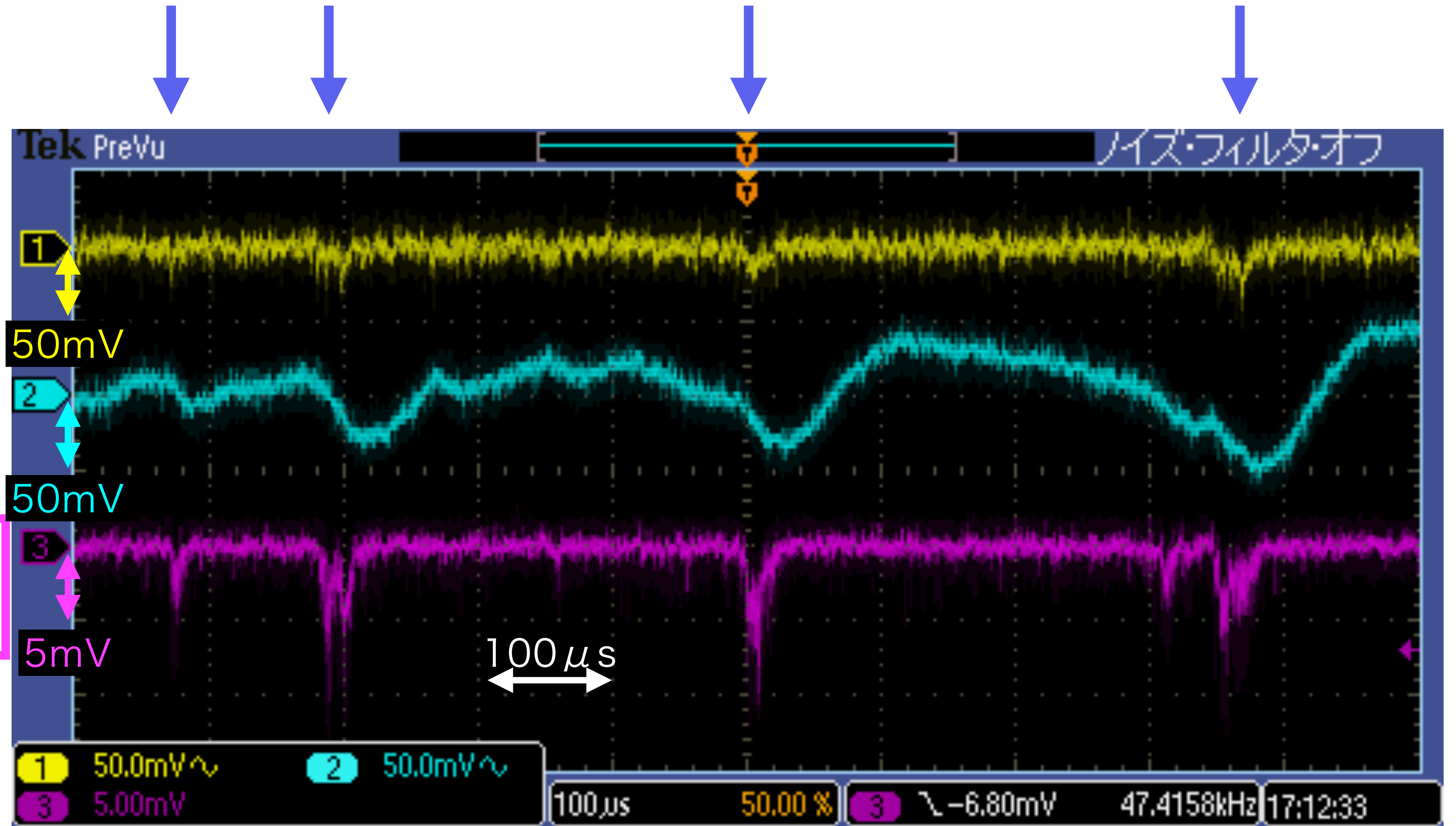
- 赤色LEDの主波長(650 nm)に対してMPPCの検出効率: 22%
- 大気中、PMT電位がGND付近での試験
- PMTのダークカレントでLEDを発光させ、光ファイバーを通してMPPCで読み出す

試験結果

PMT信号(ACカップリング)
10M Ω プローブ

LED電圧(ACカップリング)
10M Ω プローブ

MPPC信号(DCカップリング)
50 Ω



- 信号の大きさに対してベース電圧が大きかったためACカップリングで測定した
- MPPCの1photo信号(~2mV)に対して3~5photon検出できている
- PMTのダークカレントでLEDが発光し、MPPCからの信号が確認できた

まとめ

AXEL実験では高圧キセノンTPCを用いて $0\nu\beta\beta$ の探索を目指している。

有効体積の拡張のためにPMTをフィールドケージの電位で運用する研究を行っている。

高電位PMT信号をLED光に変換する回路の設計と実機試験を行った。

- ・ PMTのダークカレントでLEDが発光し、MPPCで信号を読み出すことができた。

今後は、MPPCで読み出した信号をADCで評価する。