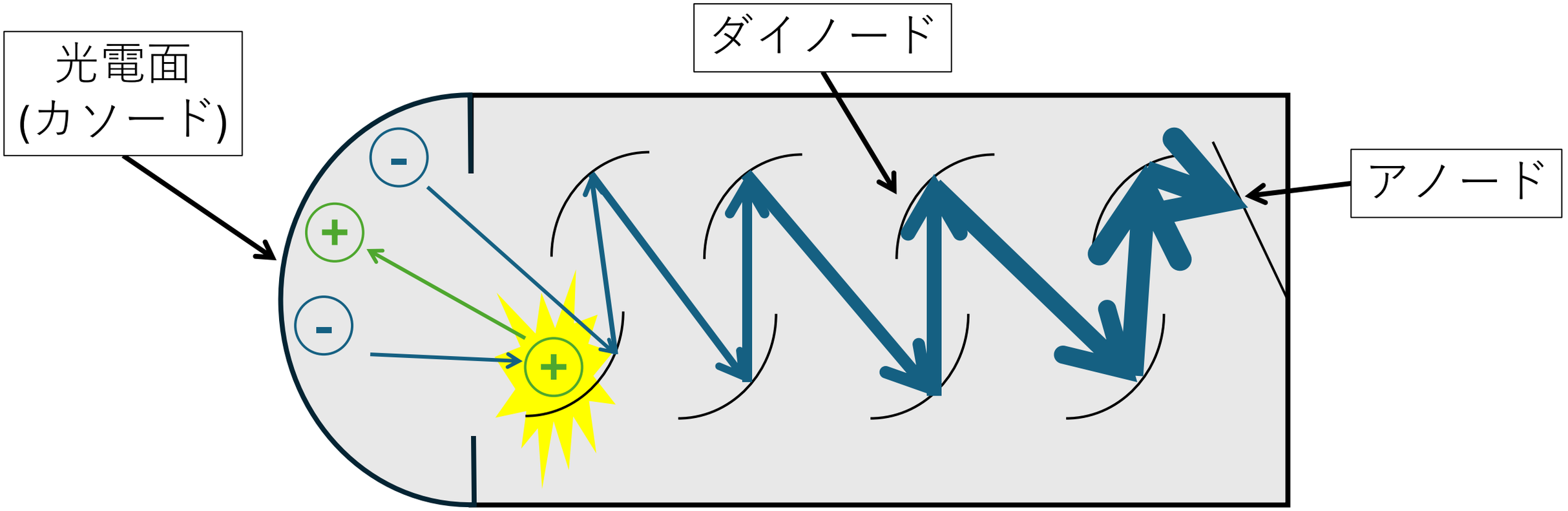
CTAO大口径望遠鏡観測データを使った夜光とPMTアフターパルスの解析

溝手雅也, 山本常夏, 早川文菜 (甲南大学),
高橋光成, 野崎誠也, 齋藤隆之, 森田開, 糸川拓海, 猪目祐介,
大岡秀行, 岡知彦, 奥村曉, 折戸玲子, 片桐秀明, 清本拓人,
櫛田淳子, 窪秀利, 郡司修一, 小林志鳳, 櫻井駿介, 武石隆治,
田島宏康, 田中真伸, 手嶋政廣, 寺内健太, 寺田幸功, 門叶冬樹,
中森健之, 西嶋恭司, 野田浩司, 橋山和明

日本天文学会2026年秋季年会　2026.9.10

光電子増倍管(PMT)

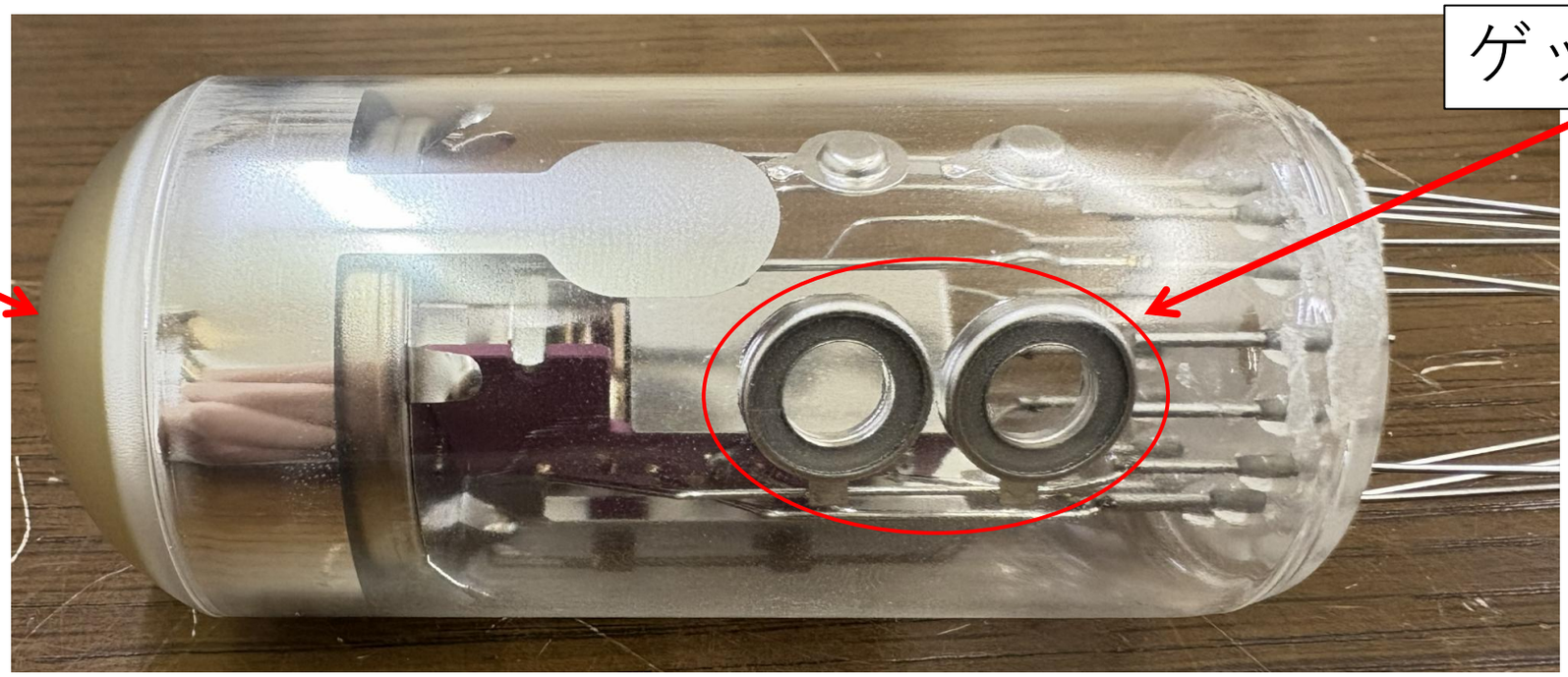


- 光電面から放出された光電子が、ダイノードで次々と増倍しながらアノードへ向かう。電子がアノードに到達することで、電気信号が取り出せる。
- 光電子がPMT内部の残留ガスと衝突すると、電離して陽イオンを放出する。陽イオンが光電面へと戻り、新たな電子を放出する。

光に対応して最初に出てくる信号を「メインパルス」と呼び、
陽イオン由来の電子による信号を「アフターパルス(AP)」と呼ぶ。

現在のPMT

現在のCTAO大口径望遠鏡(LST)に搭載されているPMTは、浜松ホトニクスが開発したものである。

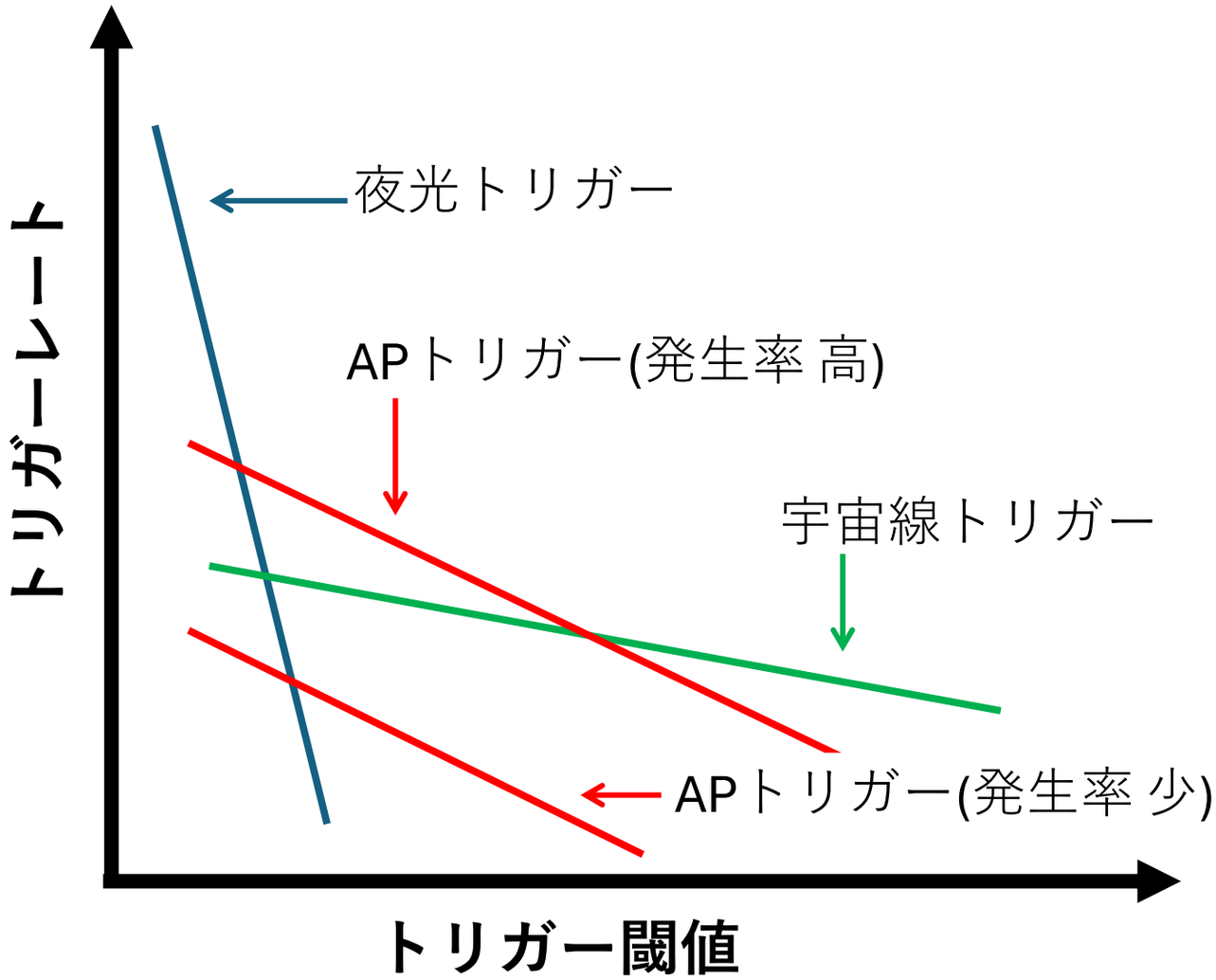


- チェレンコフ光観測のために、紫外線に対する量子効率を上げている。
- 内部を真空にして、ゲッターを入れて残留ガスを吸着する。
- １光電子に対するAPの発生確率が0.04%以下になるように設計されている。夜間の観測中には、夜光の入射によって約300MHzの頻度で光電子が放出されるので、約120kHzの頻度でAPが発生する。

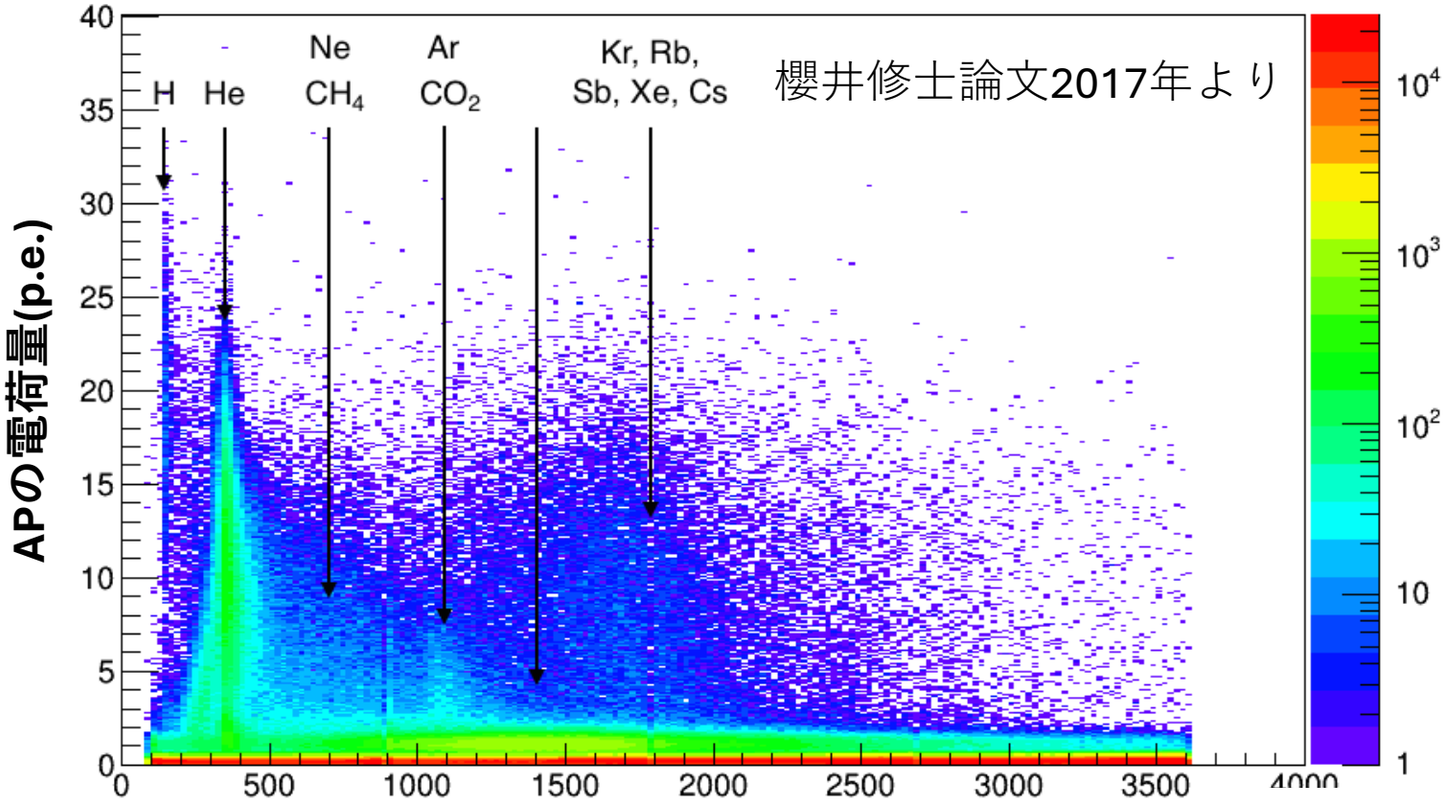
APの影響

- 観測中の望遠鏡には宇宙線とN夜光(NSB)が入射する。これらはガンマ線観測におけるバックグラウンドになる。
- バックグラウンド(主に夜光)を基準にトリガー閾値を決めて、低エネルギーガンマ線を観測している。

- 電荷量の大きいAPの発生率が増加すると、トリガー閾値を引き上げる必要が生じる。これは観測可能エネルギーの下限値に影響する。

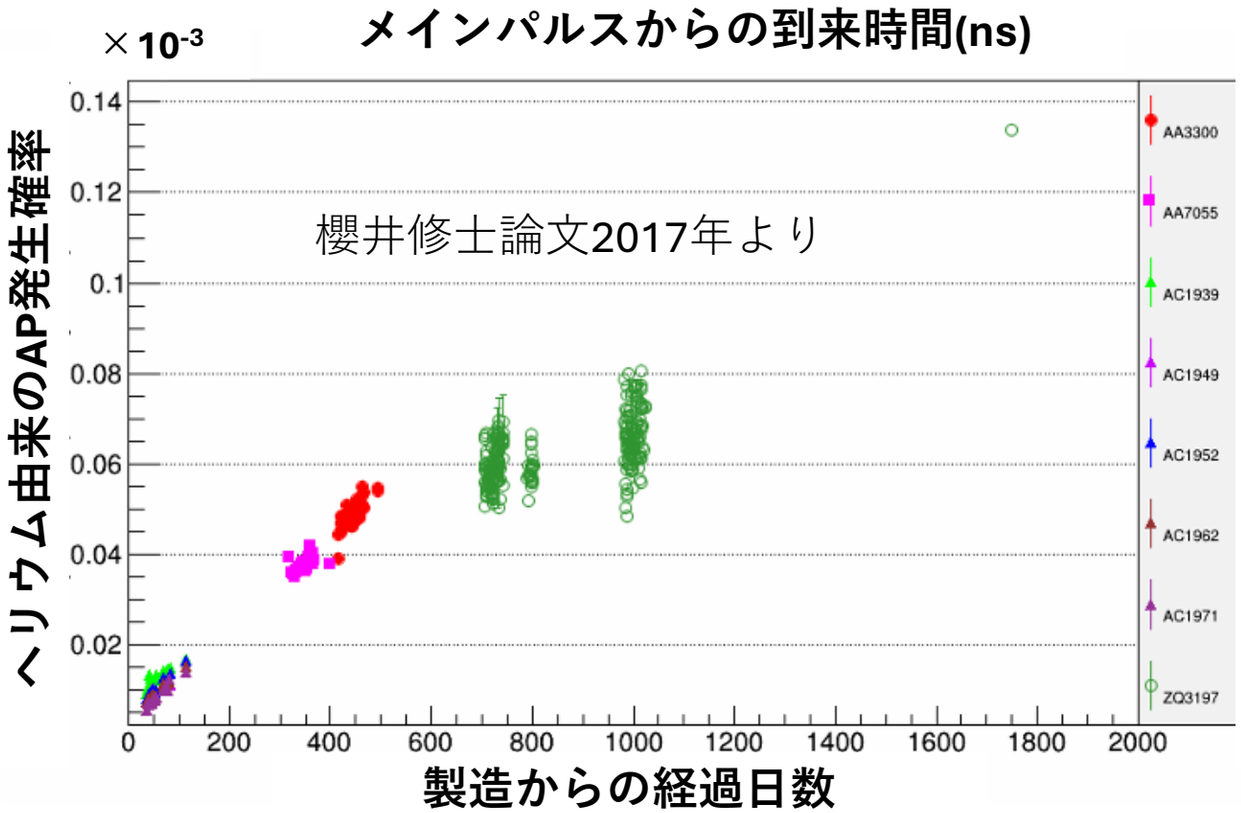


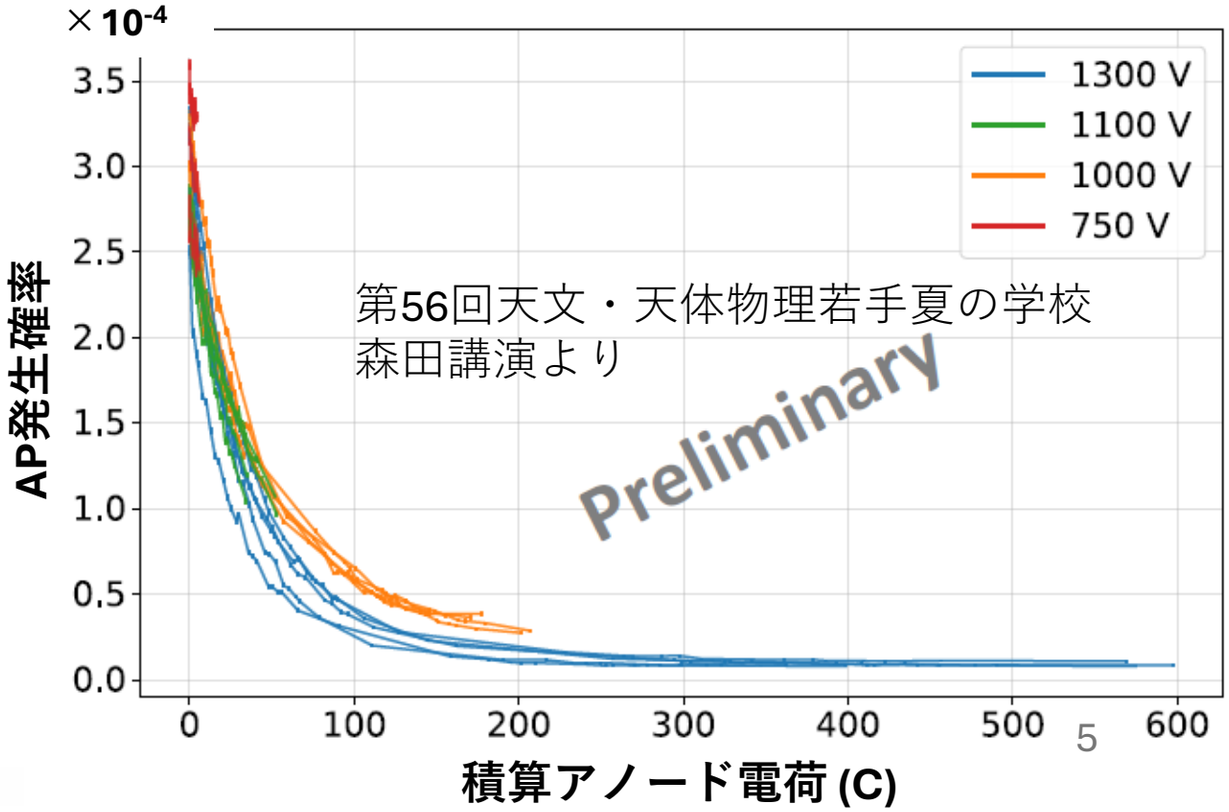
実験室測定



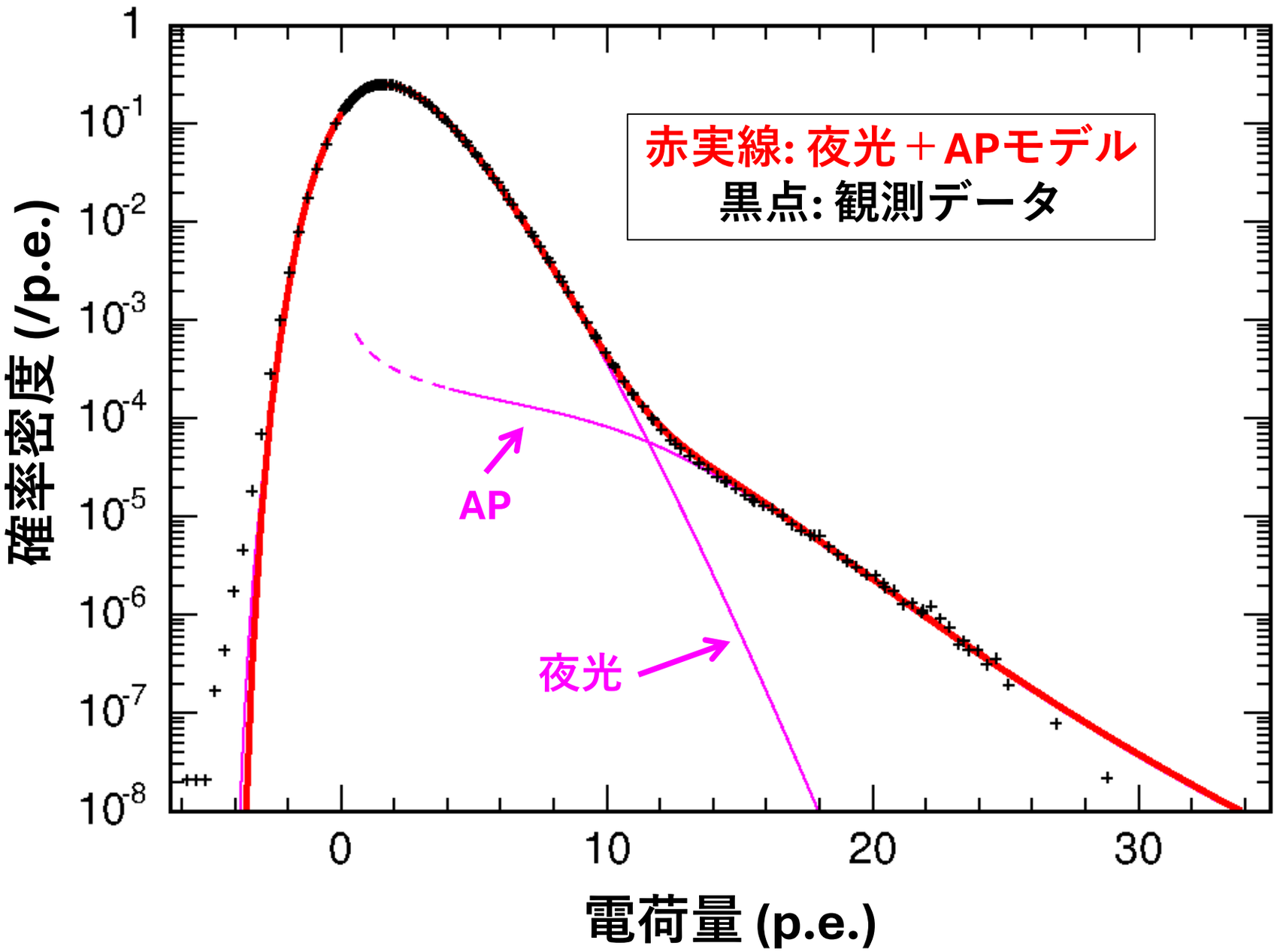
上左図：ヘリウムが、APの発生に大きな影響を与えていると推定。
下左図：AP発生確率が、時間に伴って増加している。
下右図：AP発生確率が、アノードに流れた電流に伴って減少している。

APは時間によって増減していると分かったので、LSTに搭載されているPMTのAP発生確率が時間とともにどう変化しているか調べる。



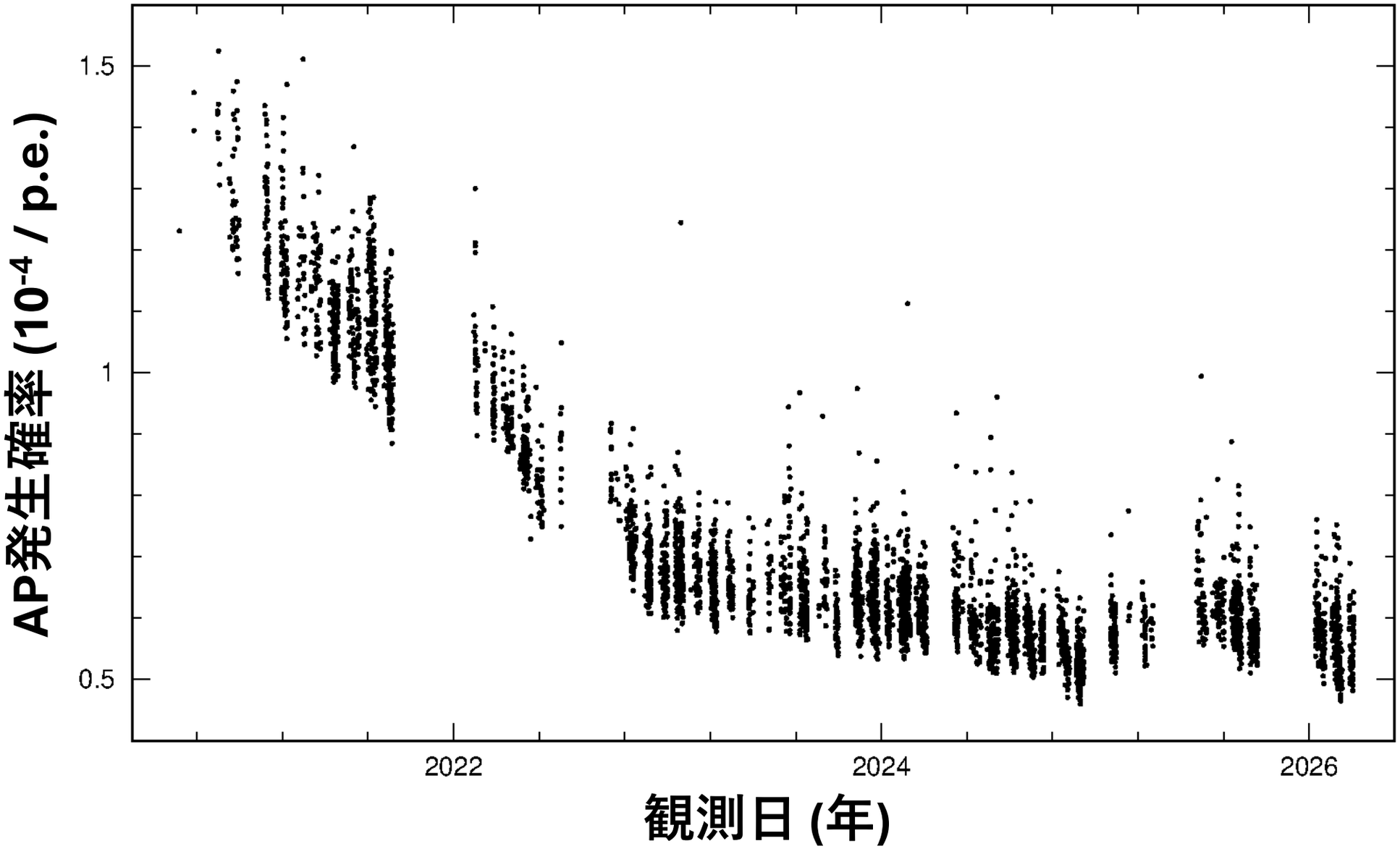


夜光とAPのフィットモデル



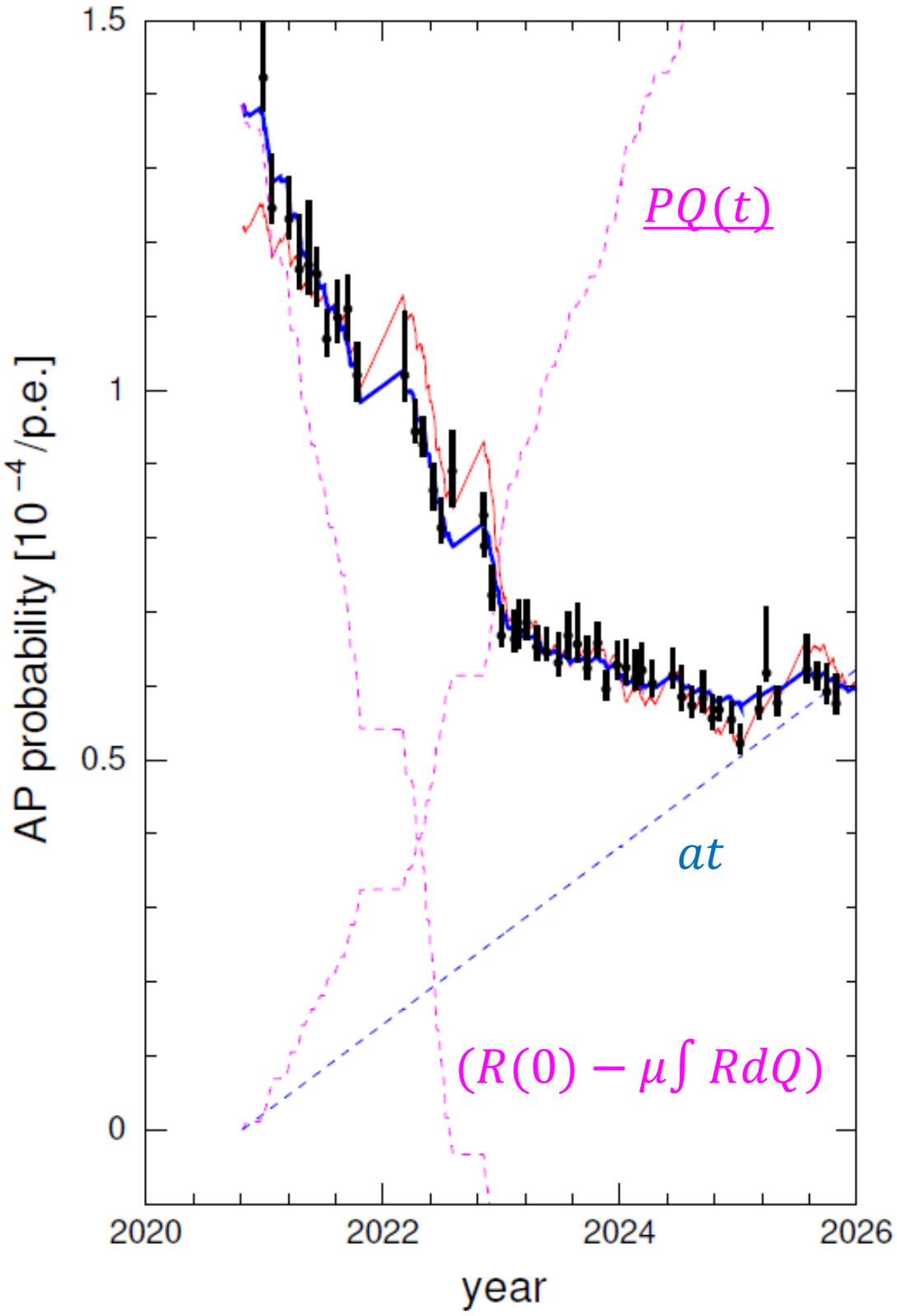
DL1からinterleaved pedestalのデータを抜き出して解析し、36nsの時間窓で検出されるチェレンコフ光以外の信号の確率密度(=ノイズ分布)になっている。さらに、実験室測定の解析をもとに夜光とAPのモデルを構築し、両者を組み合わせたノイズモデルを作成した。

AP発生確率の時間変化



2020~2026年の観測データを使い、AP発生確率の時間変動を求めた。2021~2023年でAPが観測とともに減少していることと、2023年以降で値がほぼ一定になっていることが分かった。

AP発生確率の時間変化



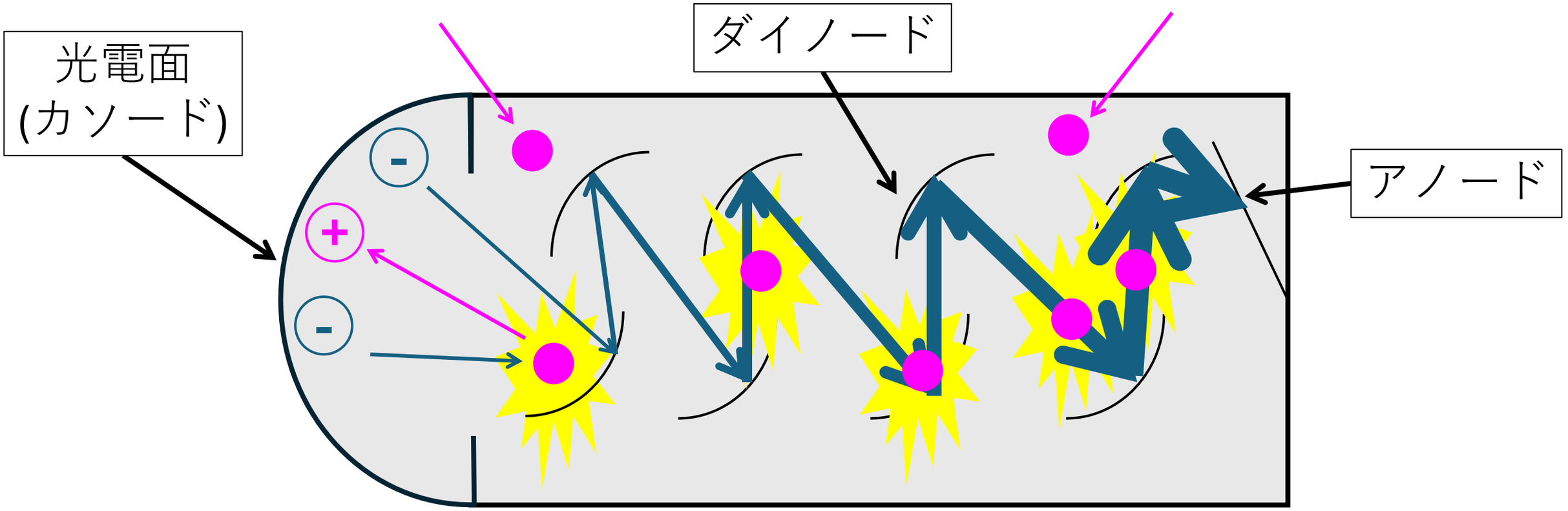
実験室の測定結果からAP発生確率は、時間と共に増える効果と、アノード電荷の増加と共に減る効果が確認されている。この２つの効果から作った式でフィッティングを行った結果が左図の赤実線である。
モデルの精度を上げるために、アノード電荷と共に増加する効果を考慮した式を構築した。

$$R(t) = at + \left(R(0) - \mu \int R(t)dQ(t)\right) + PQ(t)$$

R: AP発生確率, a: AP増加率,
μ: AP減少係数, Q:累積アノード電流,
P: 定数(アノード電流に伴う増加率)

上式のパラメータを最適化して、観測データにフィットさせた結果が左図の青実線である。

残留ガス分子



実験室測定から、APの減少と増加には以下の２つの要因が考えられている。

- ガラスを透過して外から入ってくるガス分子
- PMT後段でイオン化されて、ダイノードに付着する分子

一方でアノード電荷と共に増加する成分として、以下の成分を考えている。

- 光電子の衝突によって、ダイノードから蹴りだされる分子

結論

- 夜光とAPの信号分布をモデル化することにより、LST観測データからAP発生確率を推定する手法を開発した。
- 解析結果をもとに、APの変動を再現するモデルを構築した。
- 稼働中のチェレンコフ望遠鏡カメラにおける、AP発生確率の長期的な変化を初めて測定することに成功した。

- 専用の実験室測定を必要とせずに、観測データを用いてPMTを監視するツールの開発を目指す。