

長寿命型MCP-PMTの寿命改善 に向けた光電面劣化に寄与する 内部残留ガスの測定

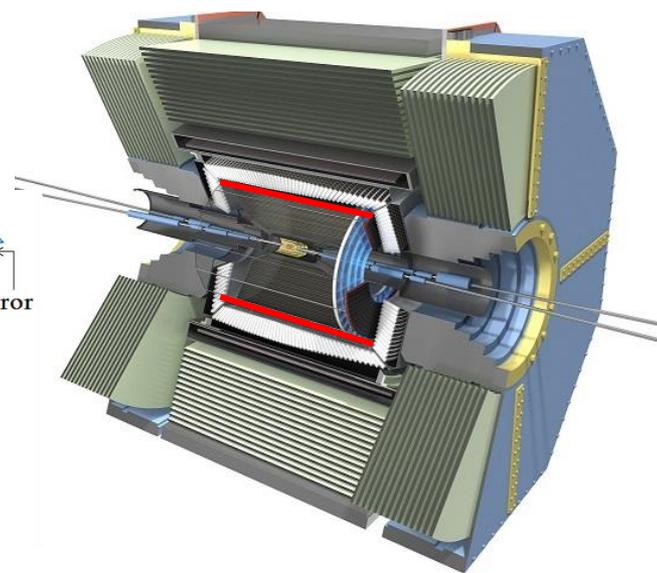
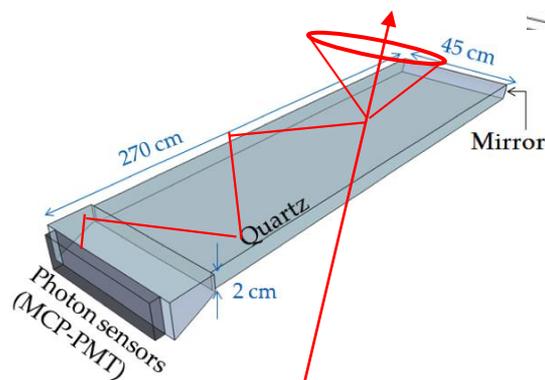
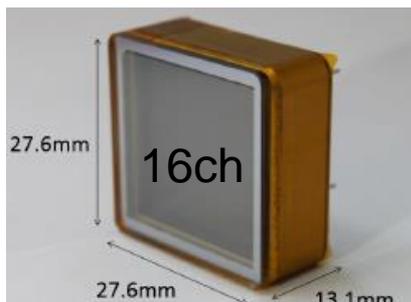
名古屋大学

高エネルギー素粒子物理学研究室(N研) M1

室山玄太

TOPカウンターとMCP-PMT

- 名古屋大学では Belle II 実験で用いる次世代粒子識別検出器 TOP(Time-Of-Propagation)カウンターの開発を行ってきた
- TOPカウンターで用いる角型MCP(Micro Channel Plate)-PMTも名古屋大学が浜松ホトニクスと共同で開発
 - ⇒高い1光子時間分解能や量子効率を持つ
- 高バックグラウンドレートでの使用が想定
 - ⇒耐用年数が課題



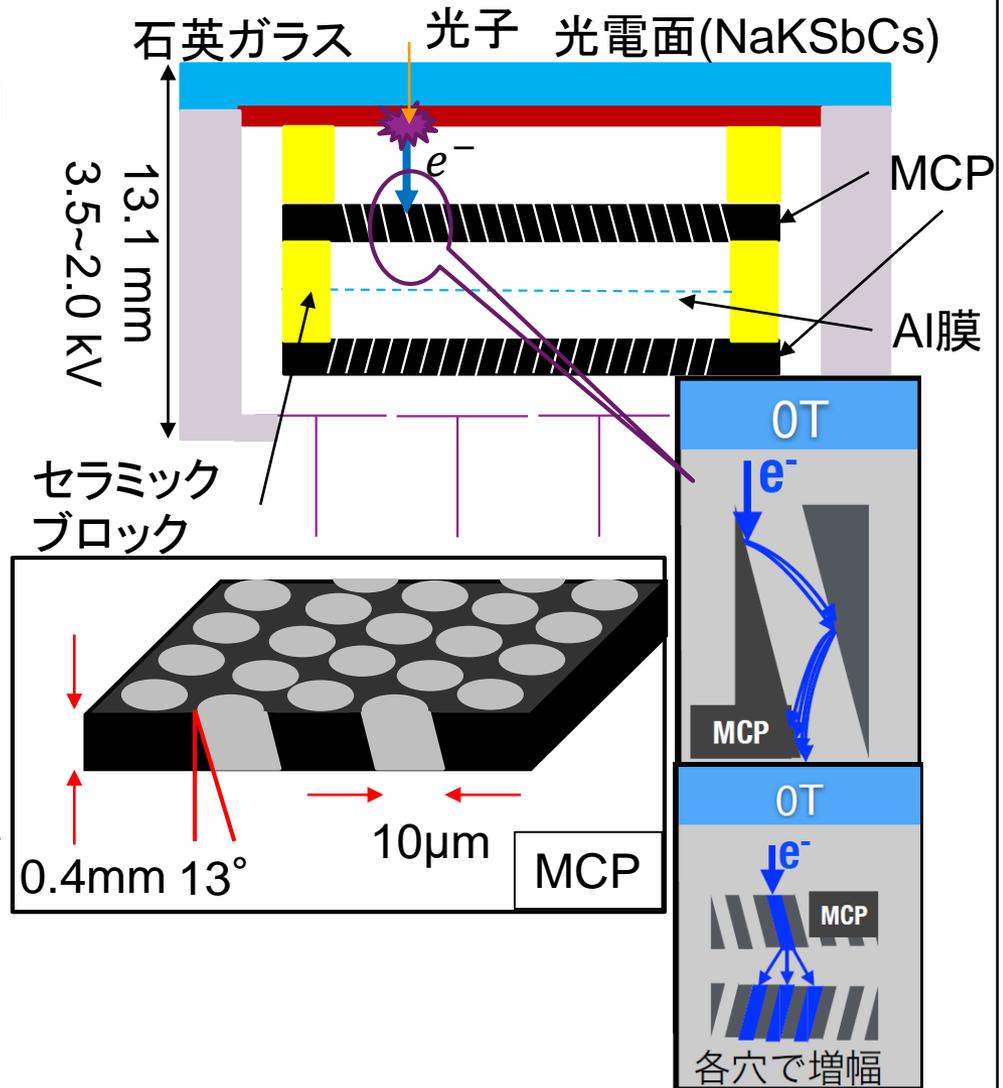
TOPカウンター用MCP-PMTの性能

1光子時間分解能	約 30 ps
平均量子効率	28%(ピーク波長)
収集効率	約55%以上

バレル部分に16機が設置
チェレンコフ光の伝搬時間と
位置から角度を求め、粒子を
識別する

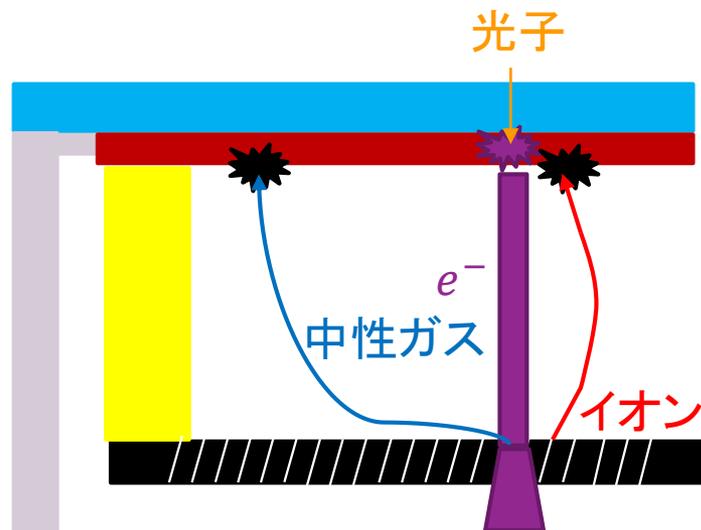
TOPカウンター用MCP-PMT

- 光電子は電場に沿ってMCPに向かって進む
- MCPの穴の内部が増幅部分
 - ⇒ 電子が壁に衝突、増幅穴の内部で何度も繰り返す
 - ⇒ さらに二段目では複数の穴で増幅する
- 小さな領域で高いgainが得られる
- 増幅領域が非常に短いため高い時間応答性を持つ



MCP-PMTの寿命

- 光電面の量子効率(QE)が低下はMCP-PMTの出力電荷で決まる
⇒QEが初期の80%になる出力電荷を寿命とする
- MCP表面など内部に残るガスが増幅過程で電子と衝突、中性ガスやイオンとして内部に放出される
- 具体的なプロセスは不明だがこれらが光電面に達し、劣化させていると考えられる
⇒対策を行うことでMCP-PMTの寿命を延ばしてきた
- MCP表面に原子層堆積 (ALD) コーティングを行うことでイオンや中性ガスの発生を防いだと考えられる



MCP-PMT	平均寿命(出力電荷)
Conventional	1.1 [C/cm ²]
ALD	10.4 [C/cm ²]
寿命改善型ALD	13.6 [C/cm ²] 以上

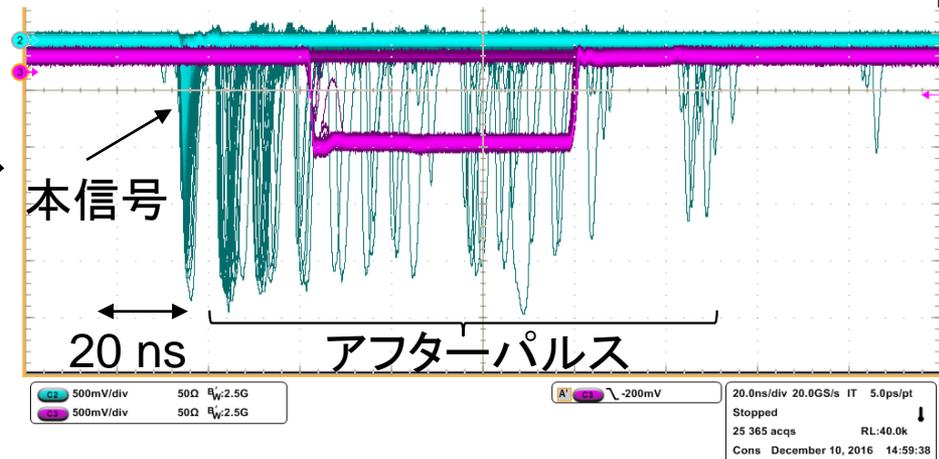
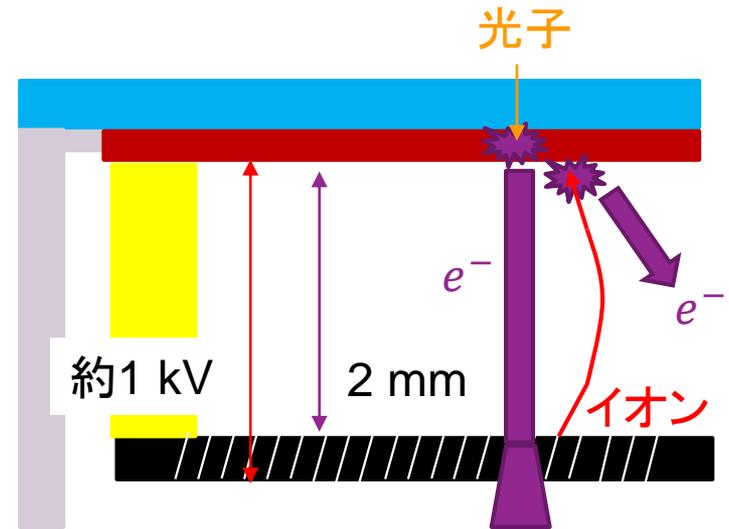
MCP-PMTの寿命

- 現在のシミュレーションによるとBelle II 実験は5年間で約 5 C/cm^2 の出力電荷を見込んでいる
 - ⇒ 実際はさらに増える可能性もあるため、さらなる寿命改善を目指す
- イオンや中性ガスがどのように光電面劣化を起こしているかわかっていない
 - ⇒ 光電面劣化のメカニズムが理解できればさらに寿命を延ばせる

内部の様子を調べる指標としてアフターパルスを用いる

アフターパルス

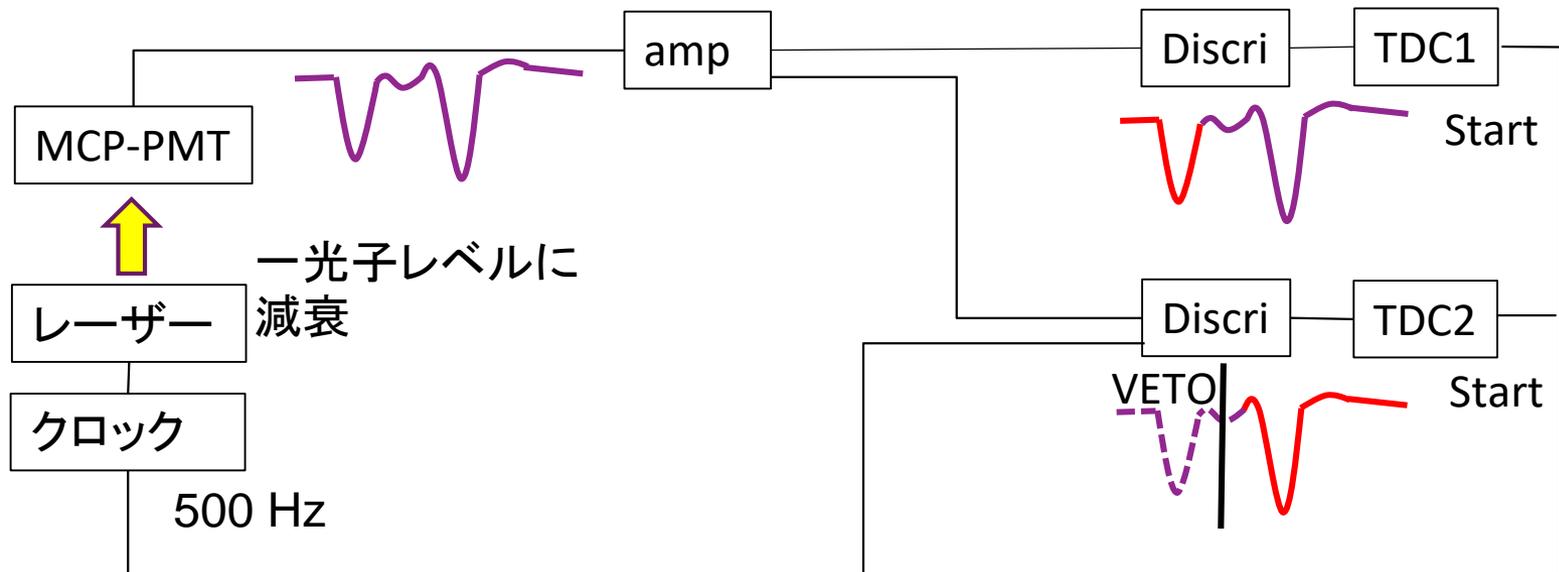
- 中性ガスやイオンが光電面に到達したとき、電子が放出されることがある
⇒増幅されアフターパルスとなる
- イオンの場合、電場に沿って移動するため本信号との時間差がその質量に依存
⇒アフターパルスから光電面にどのようなイオンが来ているかわかる
- オシロスコープでもアフターパルスの時間分布は確認できる
⇒TDCを使って定量的に測定する



オシロスコープでとったアフターパルス

セットアップ

- シングルヒットのTDCを用いて、アフターパルスの時間差を測定
- TDC1では本信号のタイミングを測定する
- TDC2ではレーザーと同期した信号を入れることで本信号の領域をVETOLし、アフターパルスのタイミングが測定できる
- 得られたTDCの値から時間差を導出する



アフターパルスの時間分布

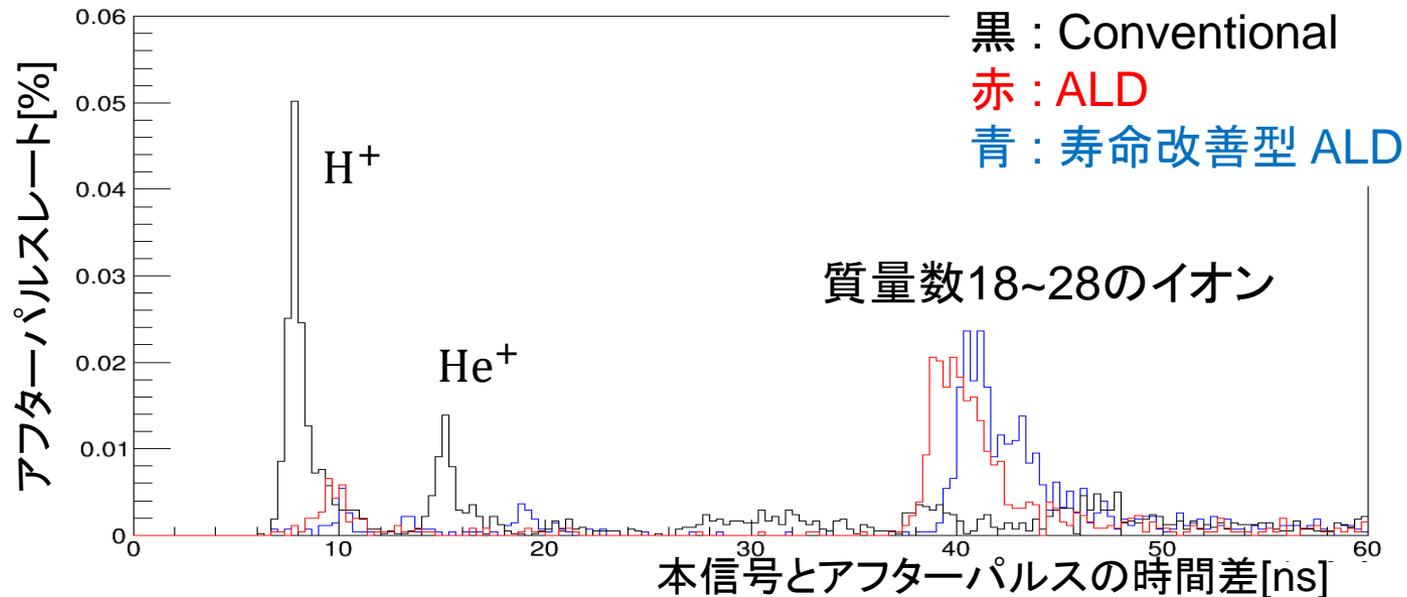
- 本信号との時間差はイオンの質量とPMTのHVに依存する

⇒時間分布からイオンの同定が可能

$$t \propto \sqrt{m_{ion}/HV}$$

- アフターパルスレートは次のように定義

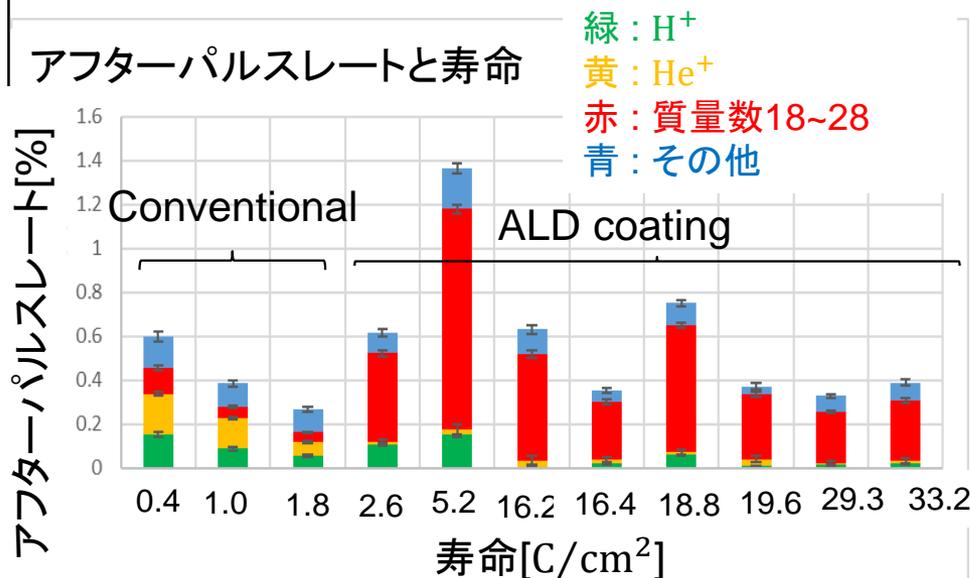
$$r [\%] = \frac{\text{アフターパルスイベント数}}{\text{本信号イベント数}} \times 100$$



- Conventionalは主に水素とヘリウムが、ALDコーティングPMTでは質量数18~28のイオンが候補となるピークが新たに現れた

レートと寿命との比較

- アフターパルスの総量と寿命の長短との相関は見られない
- 赤色で示したイオンはALDコーティングPMTでは多いが、ALDコーティング品の寿命はConventionalに比べて十分に長い
- 水素は寿命の短いConventionalに多く、寿命改善型ALDでは少なくなる
- ヘリウムもConventionalに多いが、ALDと寿命改善型ALDでの差がない
⇒寿命との相関が考えられるのは水素イオン



イオン	Conventional : ALD : 寿命改善型ALD
水素	3.7 : 2.4 : 1.0
ヘリウム	5.4 : 1.0 : 1.0
18~28	0.20 : 1.0 : 1.0
全イオン	0.8 : 1.1 : 1.0

寿命改善型ALDを基準とした各タイプの平均アフターパルスレートの比較

まとめ

- 寿命の異なる三種のPMTのアフターパルスの測定を行った
⇒タイプごとに異なるイオンが光電面にやってくることが分かった
- 全アフターパルスの割合と寿命の関連性はさほど見られない
⇒特定のイオンが光電面劣化に寄与している可能性が高い
⇒今回の測定結果では水素が主に考えられる

<今後>

- PMTの光電面劣化加速試験中にアフターパルス測定を行い、分布とレートの変化からイオンの様子を調べる

Back up

TOPカウンターの原理

- チェレンコフ光の検出位置と検出時間から
チェレンコフ角 θ を再構成
- 速度 β を導出

$$\cos\theta = \frac{1}{n\beta}$$

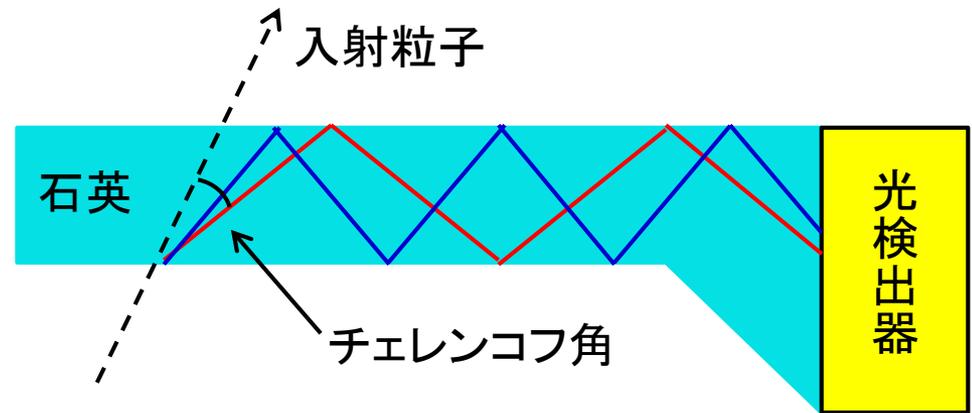
- 粒子の質量の決定

$$m = \frac{p\sqrt{1-\beta^2}}{\beta}$$

⇒ 検出器に到達する光子数: 約100個

Kと π の時間差: 100~200 ps

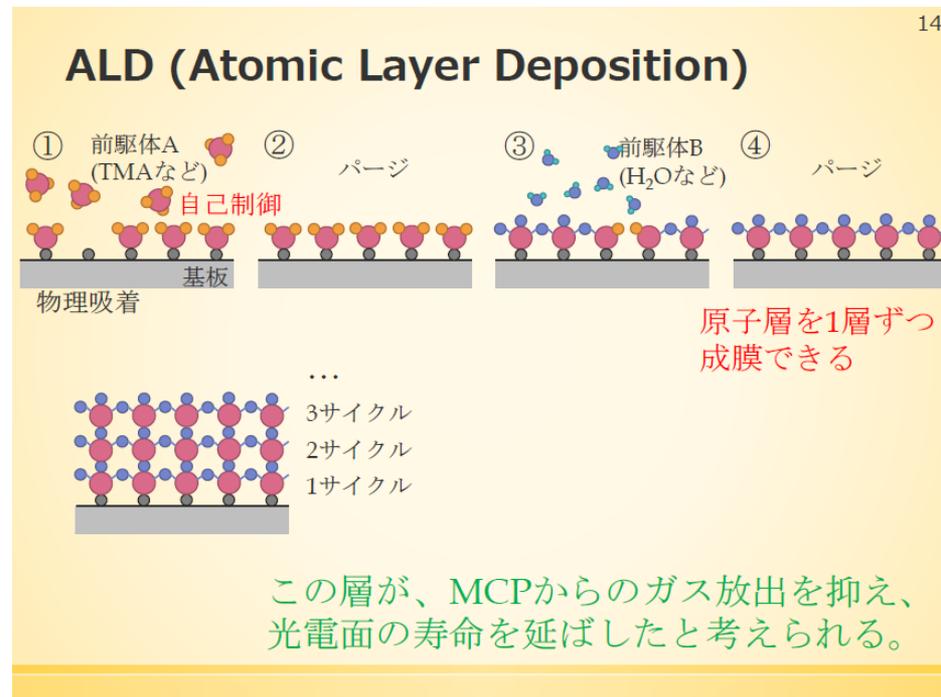
高い時間分解能と検出効率が光検出器には要求



ALDコーティング

原子層堆積 : Atomic Layer Deposition

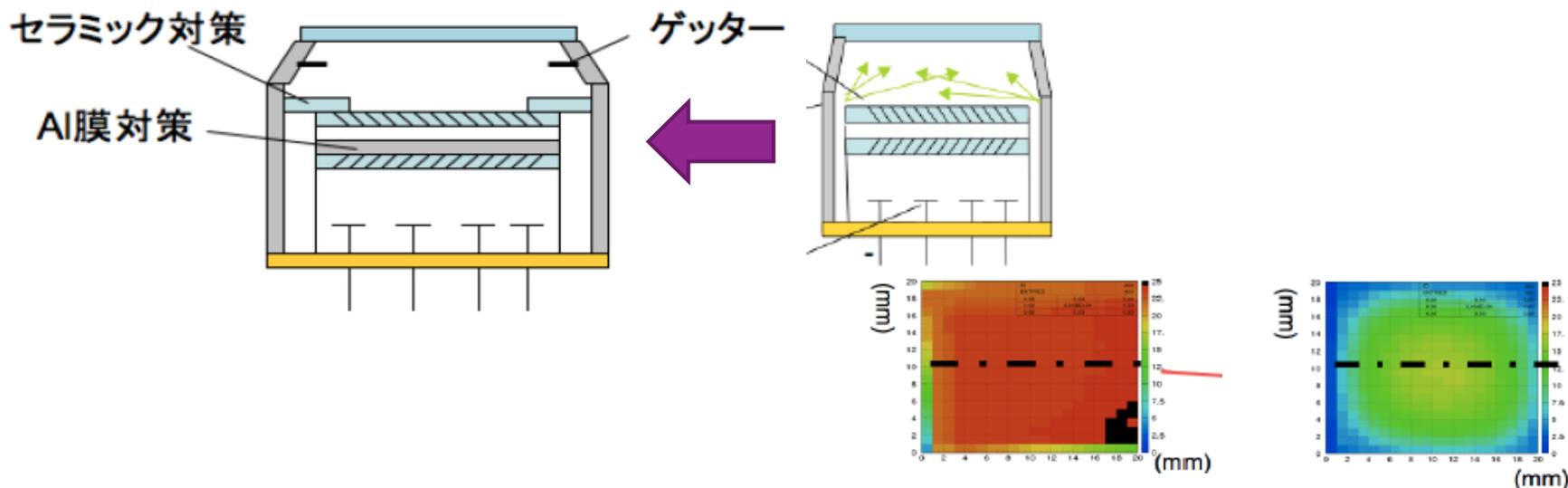
表面に原子の層を一層ずつ重ねていって、表面を均一にすることでガスの放出を抑え、同時にガスの吸着を防ぐ



名古屋大学 松岡さん
第71回物理学会スライドより

中性ガスの及ぼす影響と対策

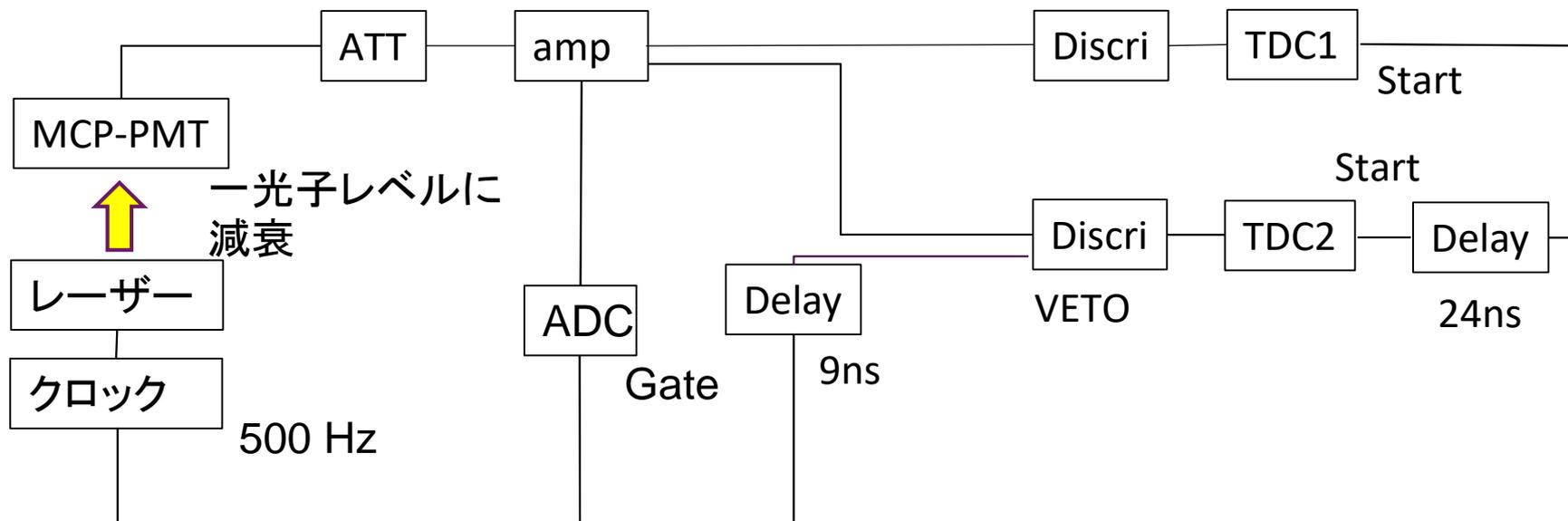
- 中性ガスが光電面に達するのを防ぐため側管の隙間にセラミックを設置



名古屋大学 神野さん
修士論文より

寿命試験前と後のQE分布
中性ガスの影響で側管周りのQEが
低下している

セットアップ



レーザー: HPK PLP 02-040

アンプ: ORTEC FTA820

アッテネータ: Mini Circuits SF-BM-6+ (一部 SM-BM-3 × 2)

ディスクリミネータ: Philips Scientific model 708

ADC: C009

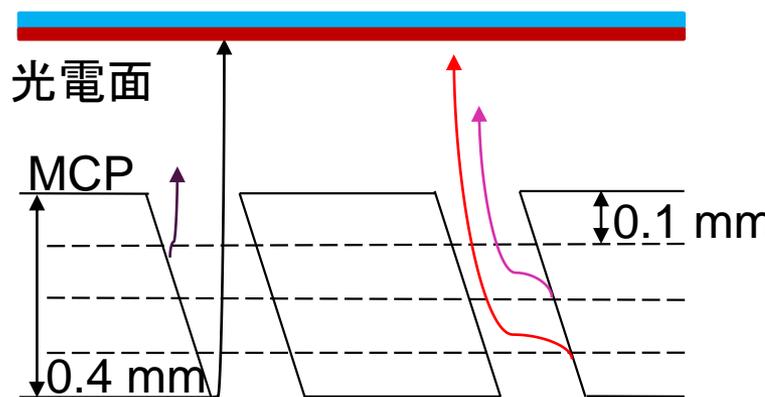
TDC: Kaizu KC3781A

イオンフィードバック時間

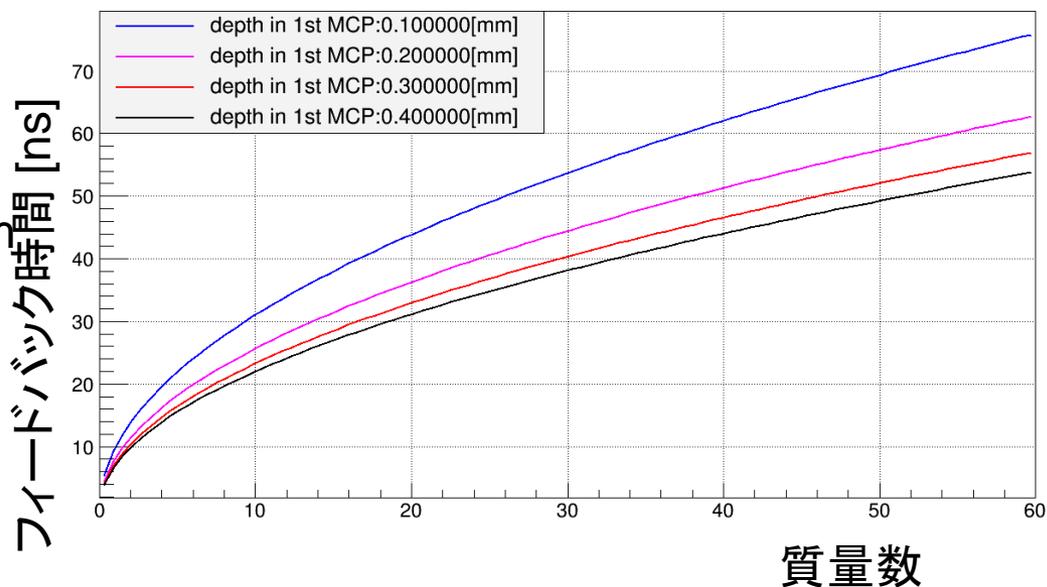
イオンのフィードバック時間はイオンの質量に次のように依存

$$The\ ion\ feed\ back\ time \propto \sqrt{m_{ion}}$$

これをもとに位置ごとのイオンの到達時間を計算



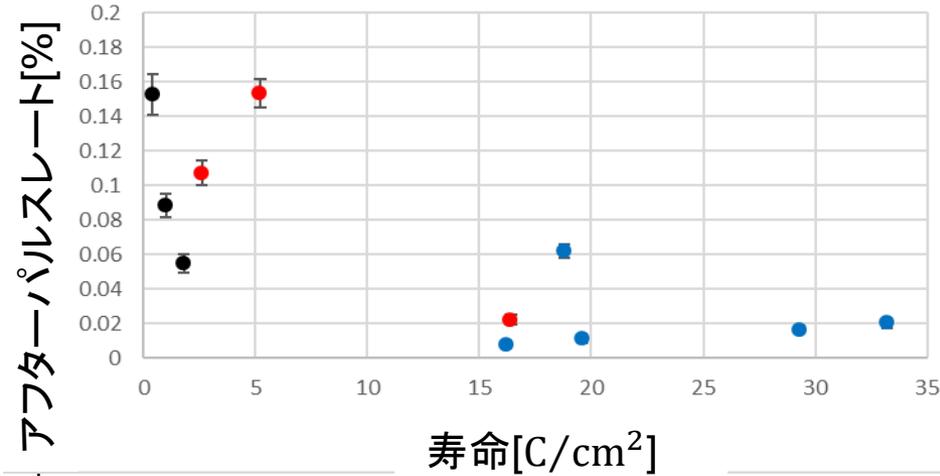
イオンの発生位置と経路



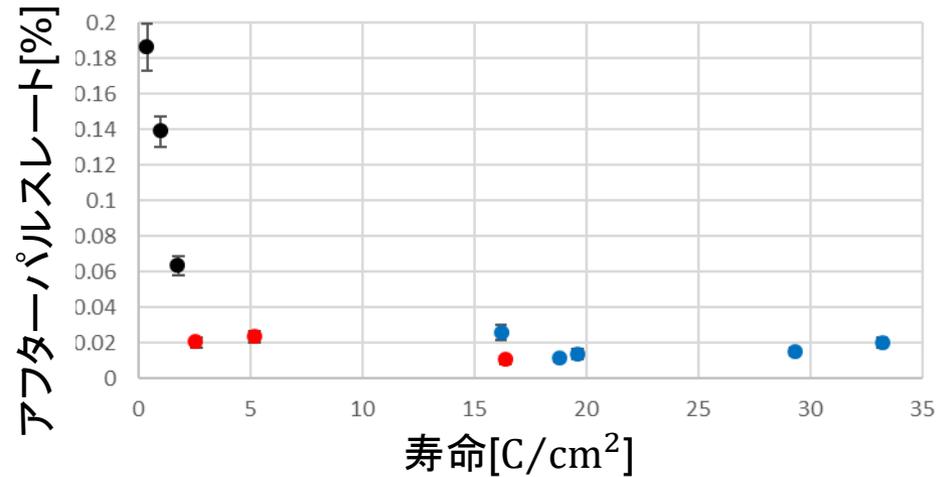
各イオンと寿命の比較

黒: Conventional
 赤: ALD
 青: 寿命改善型ALD

水素



ヘリウム



18~28

