
タウ物理のための検出器 R&D

名古屋大学 N研
M1 富田 光俊

-Contents-

•Introduction

•光検出器

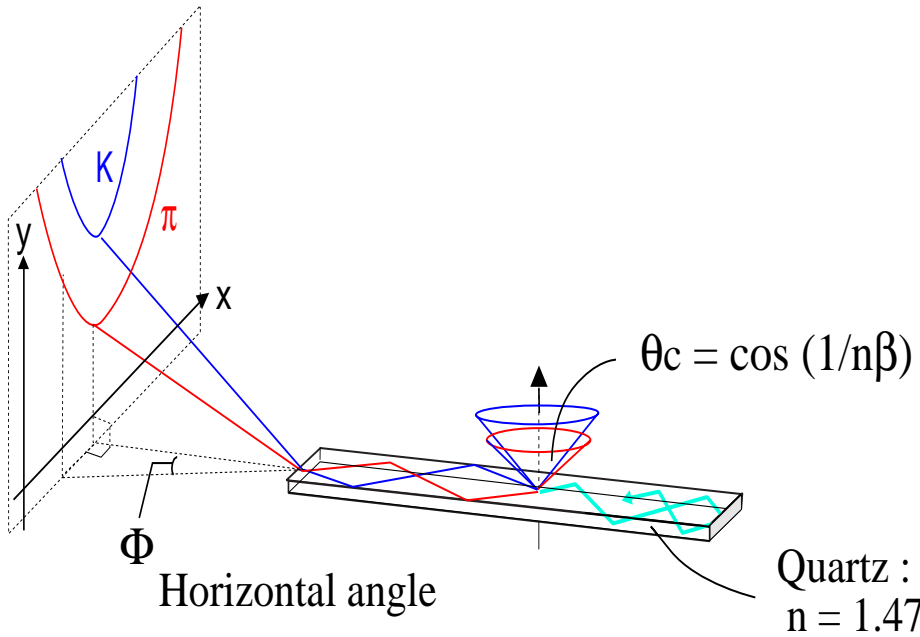
-MCP-PMT

-角型マルチアノードMCP-PMT

•まとめ

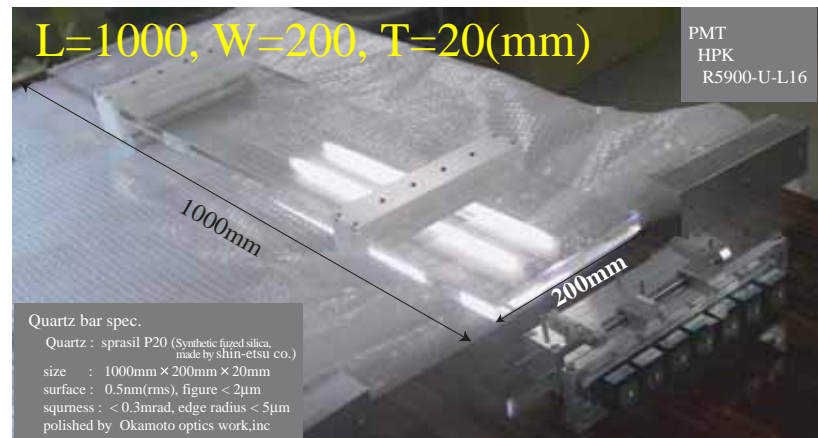
Introduction

● 新型リングイメージ型 π/K 粒子識別装置 …… Bar-TOP counter



- Belle実験用 π/K 粒子識別装置
- チレンコフ光の**水平放出角と伝播時間**からリングイメージを再構成して粒子識別を行う
- **コンパクトかつシンプル**
 - 合成石英 (発光媒体)
 - **光検出器**

位置・伝播時間の測定
→ **光検出器**

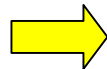


光検出器

- 光検出器に要求される性能

1. 1光子検出可能
2. 1光子での時間分解能 $< 50\text{ps}$
3. 磁場中で使用可能($B=1.5\text{T}$)
4. 収集効率 50%
5. 位置分解能 $\sim 5\text{mm}$

全ての要求を満たす光検出器はまだ存在しない

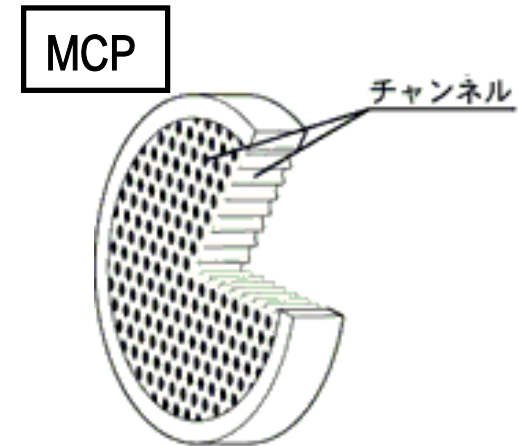


MCP-PMT

Micro Channel Plate(MCP)-PMT

MCP(マイクロチャンネルプレート)

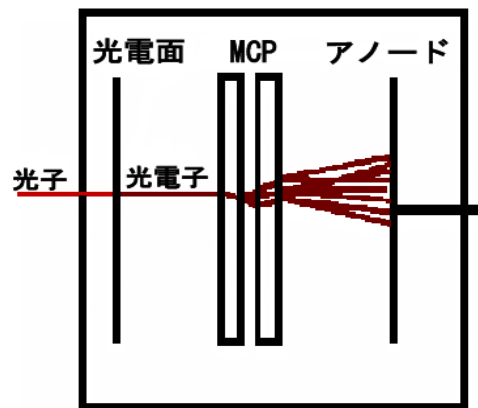
- 直径数 μm ~ 数十 μm の細いガラスパイプチャンネルを多数束ねた板状構造
- 各ガラスパイプが独立した2次電子増倍部
- MCPの両端に印加された電圧で電子が加速されMCPに衝突し、2次電子を放出



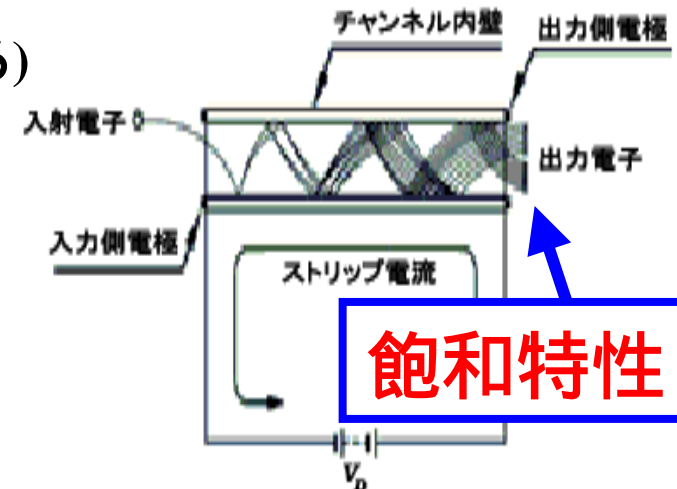
MCP-PMTの特徴

1. 高Gain (MCP2枚で $10^5 \sim 10^6$)
2. 高時間分解能 (MCP1枚が1mm以下)
3. 高磁場で使用可能(垂直に磁場をかける)

MCP-PMTの構造



2次電子増幅過程



研究目的

Bar-TOP counterに用いるための光検出器の研究開発
1～5の性能が要求される



オリジナル

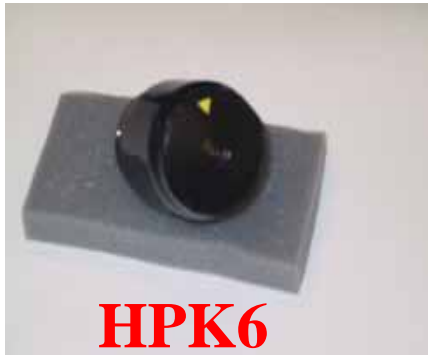
角型リニアアレーマルチアノード
MCP-PMTの開発

- 仕様の異なる4種のシングルアノードのMCP-PMTの研究
磁場中における

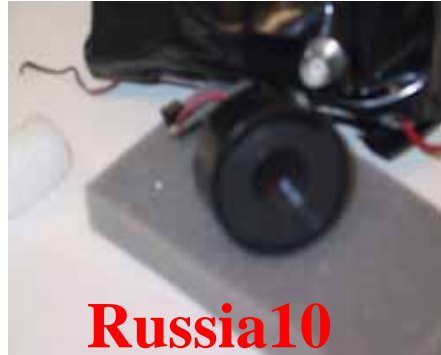
- 1光子照射時のGain
- 1光子照射時の時間分解能
- 収集効率

→ 高い性能を示すMCP-PMTの構造

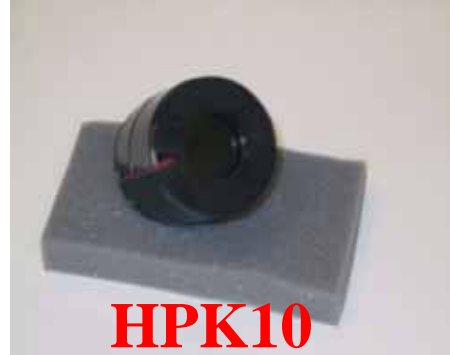
MCP-PMTの仕様



HPK6



Russia10



HPK10

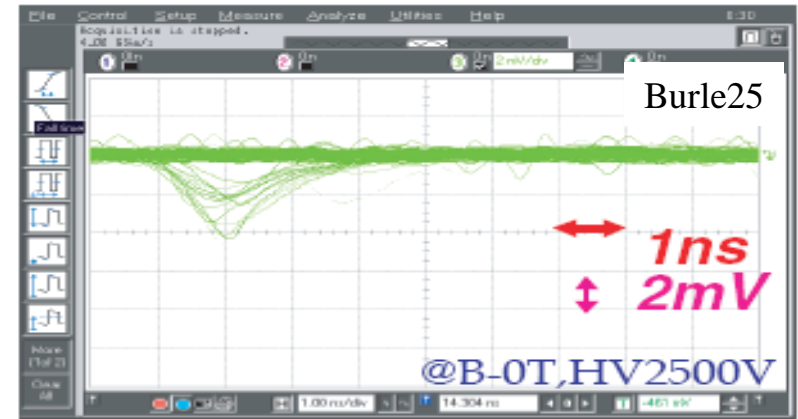
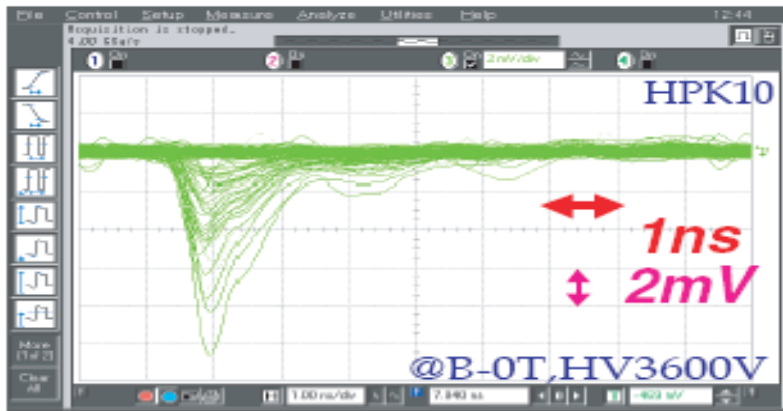
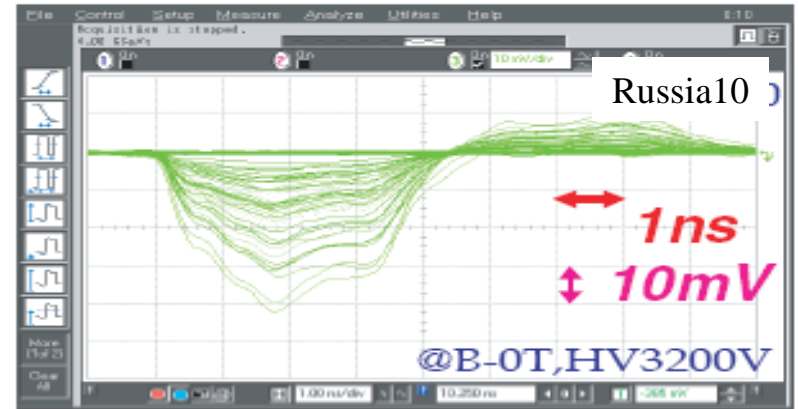
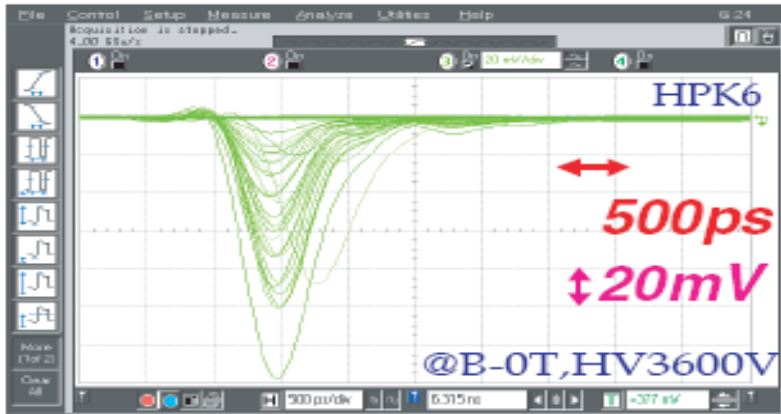


Burle25

MCP-PMT	HPK6	Russia10	HPK10	Burle25
型番号	R3809-U-50-11X	N4428	R3809-U-50-25X	85011-501
PMTの径(mm)	45	30.5	52	71x71
有効光電面 (mm)	11	18	25	50x50
MCPの枚数	2	2	2	2
MCPチャンネル径D(μm)	6	10	10	25
規格長(=L/D)	40	43	40	40
最大の印加電圧 (V)	3600	3200	3600	2500
光電面	マルチアルカリ	マルチアルカリ	マルチアルカリ	バイアルカリ
QE(%) (=408nm)	26	18	26	24

波形

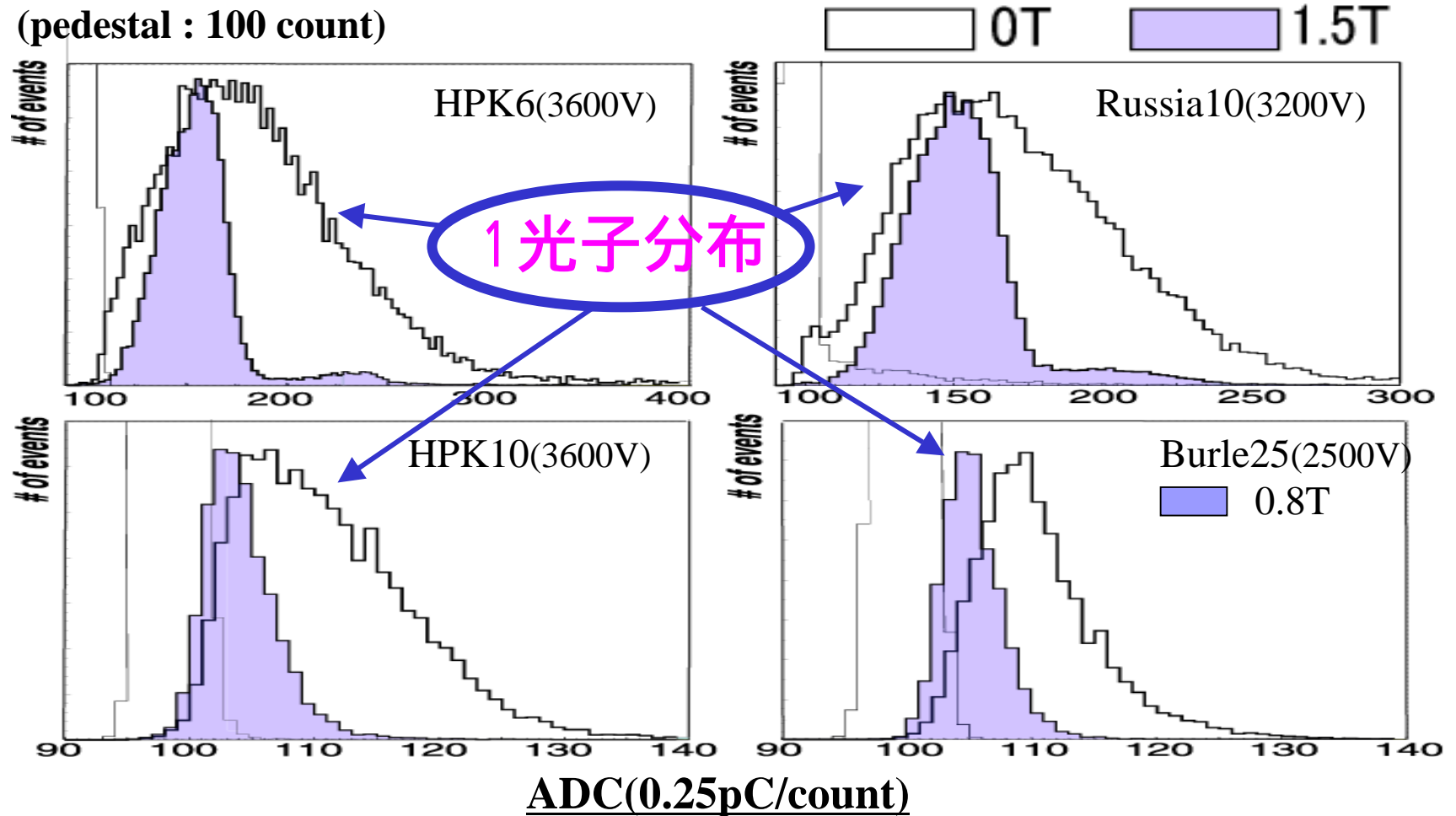
1光子照射 (磁場=0T、電圧は各MCP-PMTの最大電圧)



MCP-PMT	HPK6	Russia10	HPK10	Burle25
Rise time(ns)	0.3	1	0.4	0.8

ADC分布

(pedestal : 100 count)

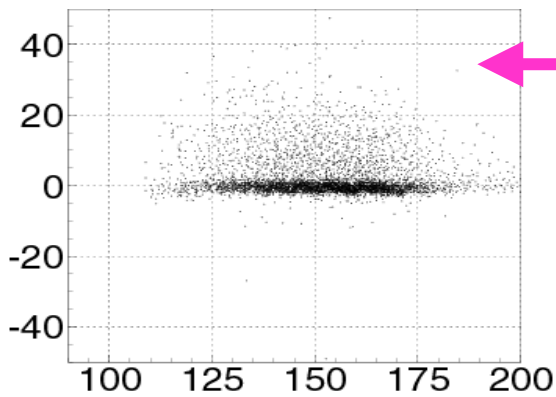


HPK6	:PHR=140%(0T)	60% (1.5T)
Russia10	:PHR=147%(0T)	71% (0.8T)

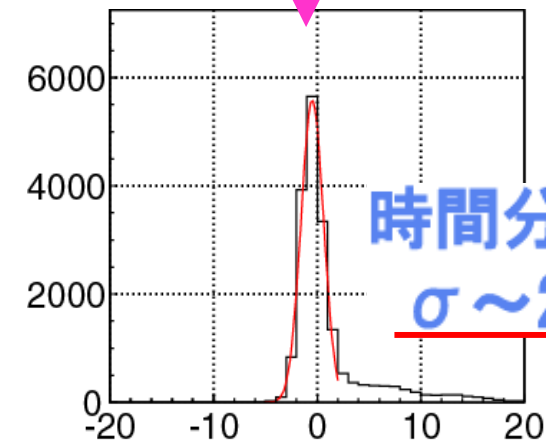
波高分解能(PHR)

$$PHR = \frac{FWHM}{\mu_{peak}} \times 100$$

ADC v.s. TDC (B=1.5T)

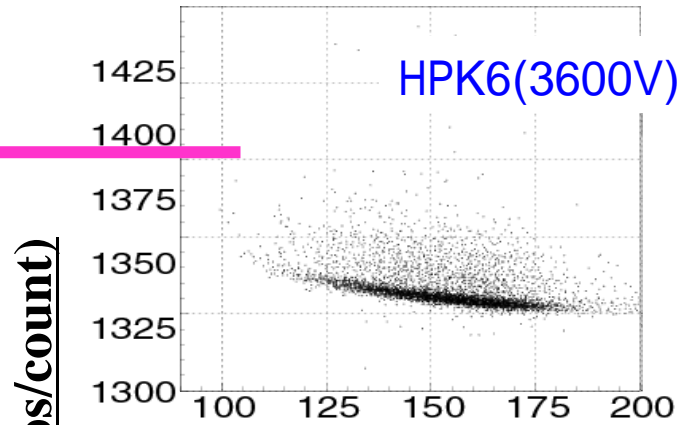


補正後のADC vs TDC

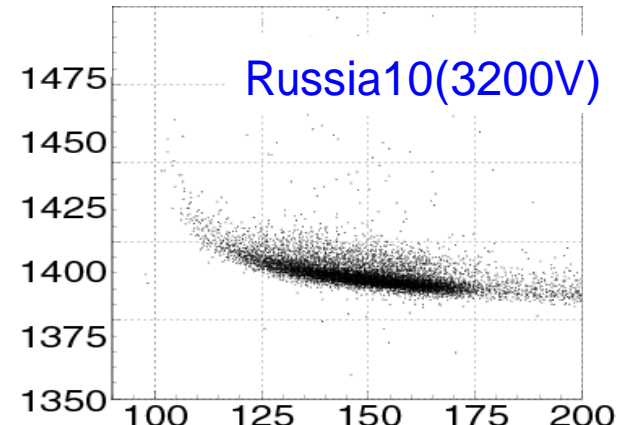


時間分解能
 $\sigma \sim 27\text{ps}$

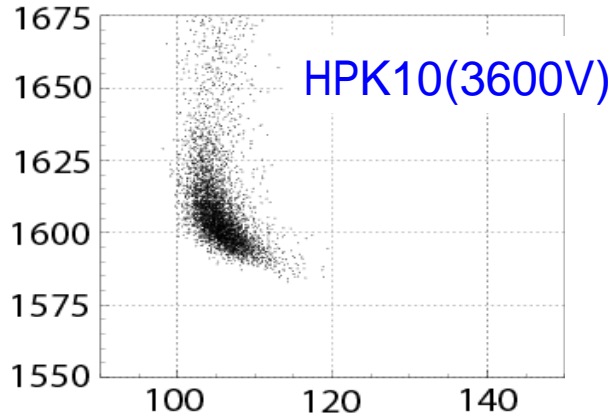
補正後のTDC分布



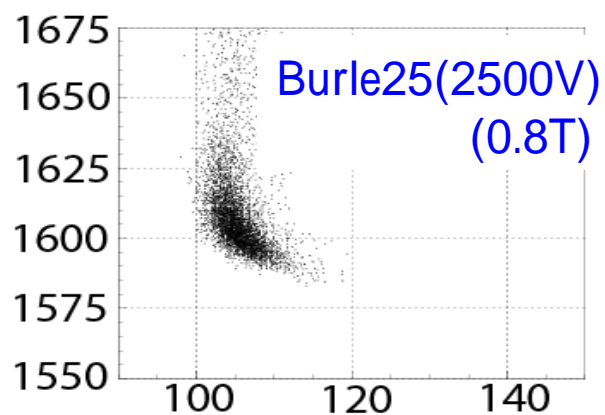
HPK6(3600V)



Russia10(3200V)



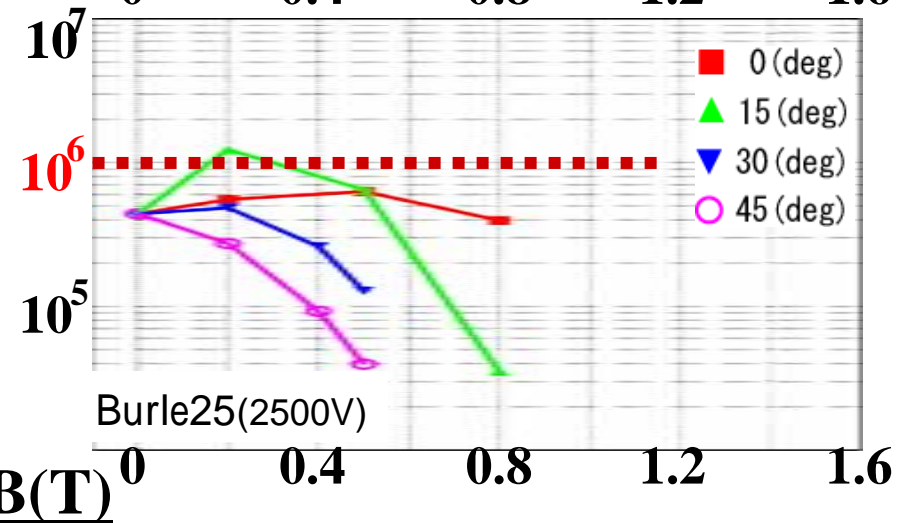
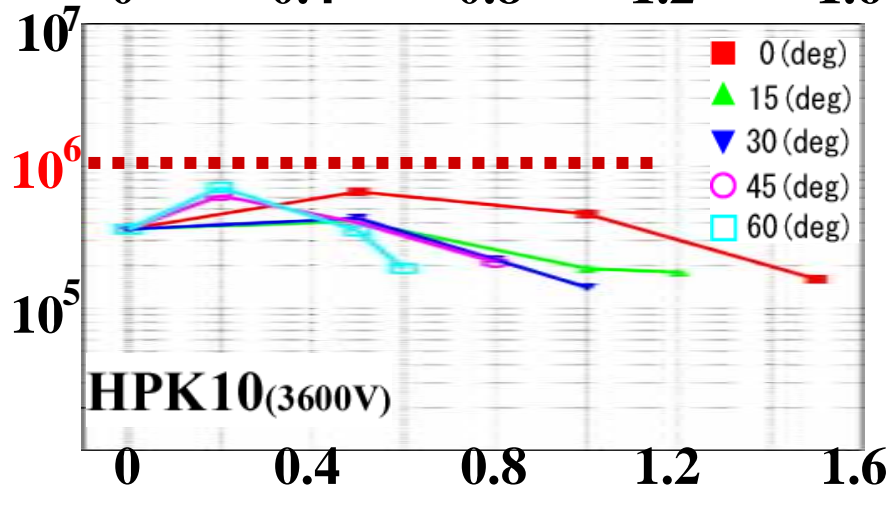
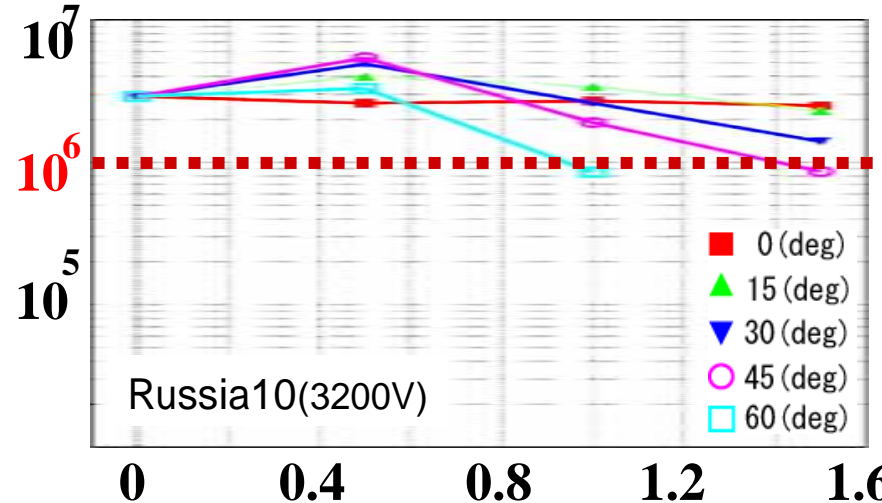
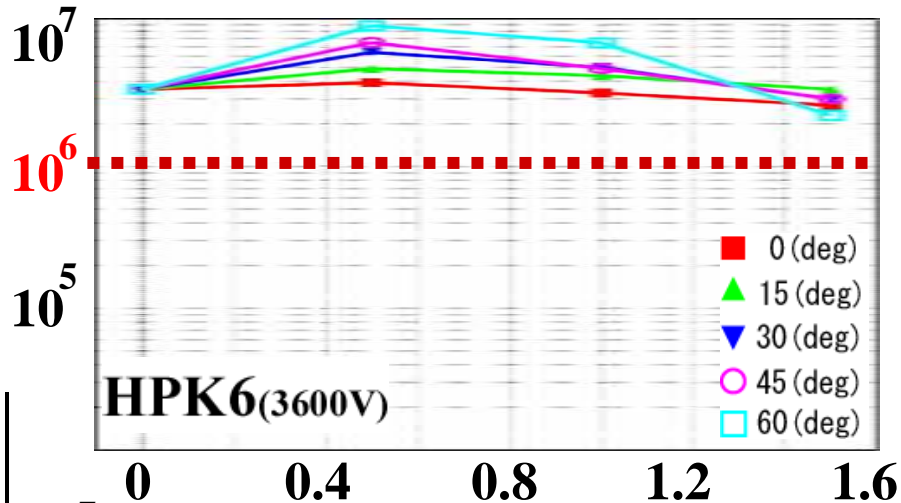
HPK10(3600V)



Burle25(2500V)
(0.8T)

ADC(0.25pC/count)

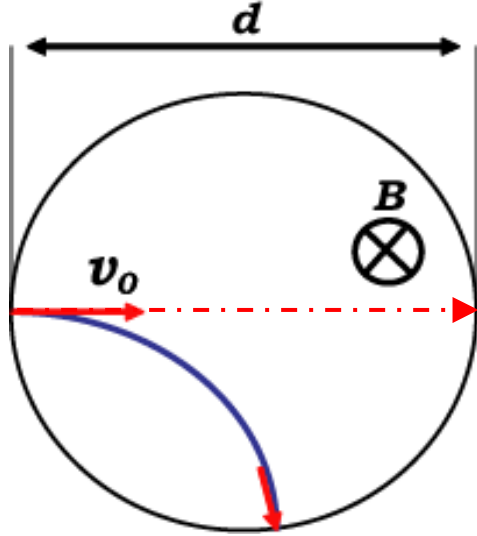
磁場 v.s. Gain



- **HPK6, Russia10** : 高磁場中でも 10^6 の高Gain
- **Burle25** : 磁場1.0T以上ではGainが低下 → 測定不可能

磁場中における2次電子のMCPチャンネル内での運動

MCPのチャンネルを上から見た図



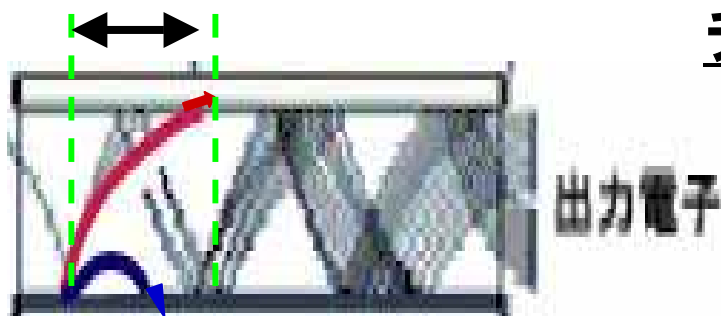
電子はローレンツ力を受け、軌道が曲げられる
電子の飛び出すエネルギーは3[eV]を用いた
(磁場 = 1.5Tでのラーモア半径 3.9[μm])

• 平面上の電子軌道

HPK6 \cdots 6 μm (0T) $\xrightarrow{85\%}$ 5.1 μm (1.5T)

burle25 \cdots 25 μm (0T) $\xrightarrow{40\%}$ 9.7 μm (1.5T)

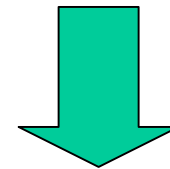
加速距離



出力電子

MCPのチャンネルを横から見た図

チャンネル径: 大 \longrightarrow 加速距離の減少大



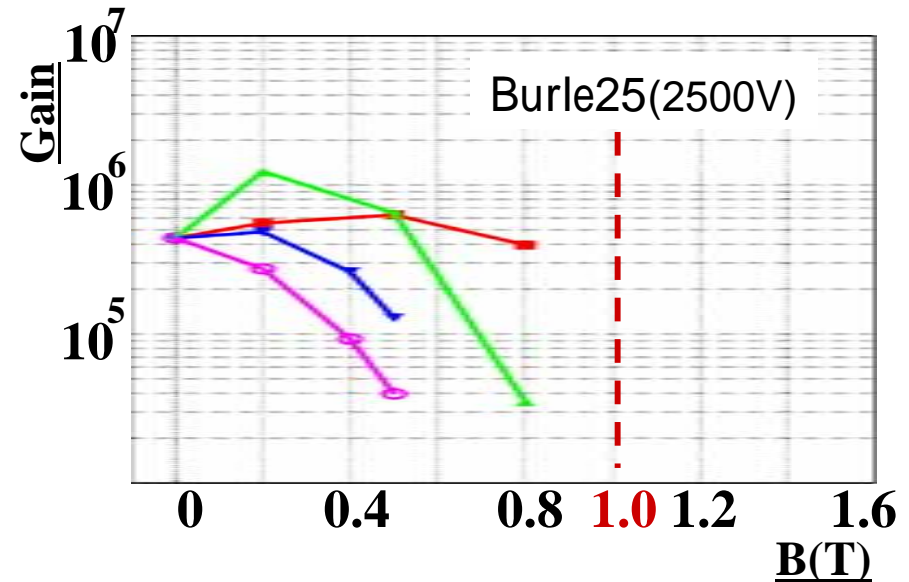
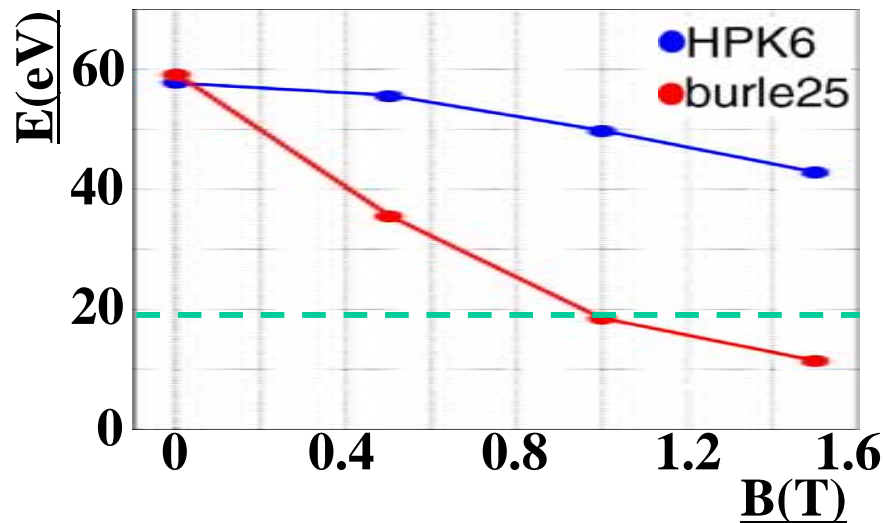
衝突エネルギーの減少大

2次電子の衝突エネルギー

衝突エネルギーはMCPからの2次電子放出数に関係

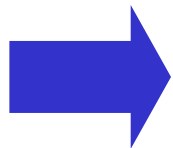
電子がMCPに衝突し、2次電子を放出する最低エネルギーは20eV

磁場 vs 衝突エネルギー



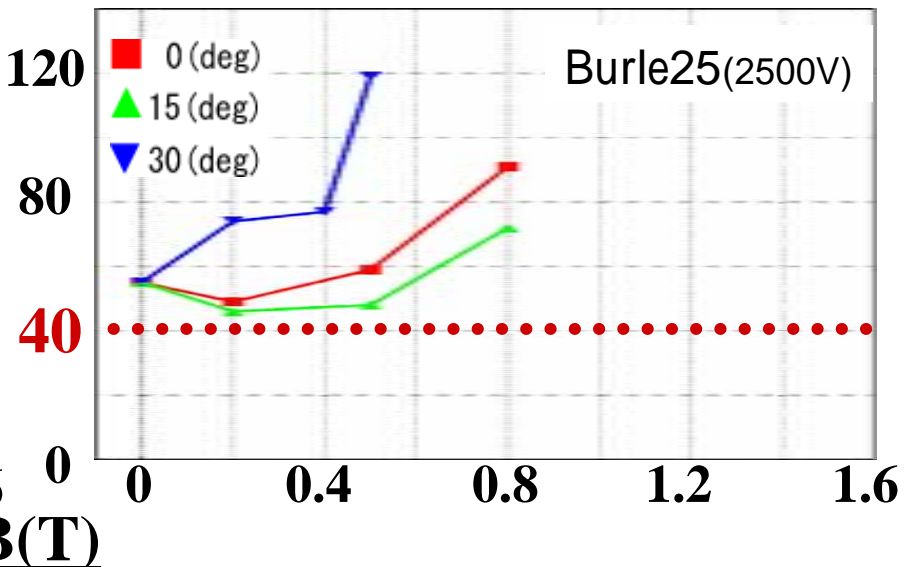
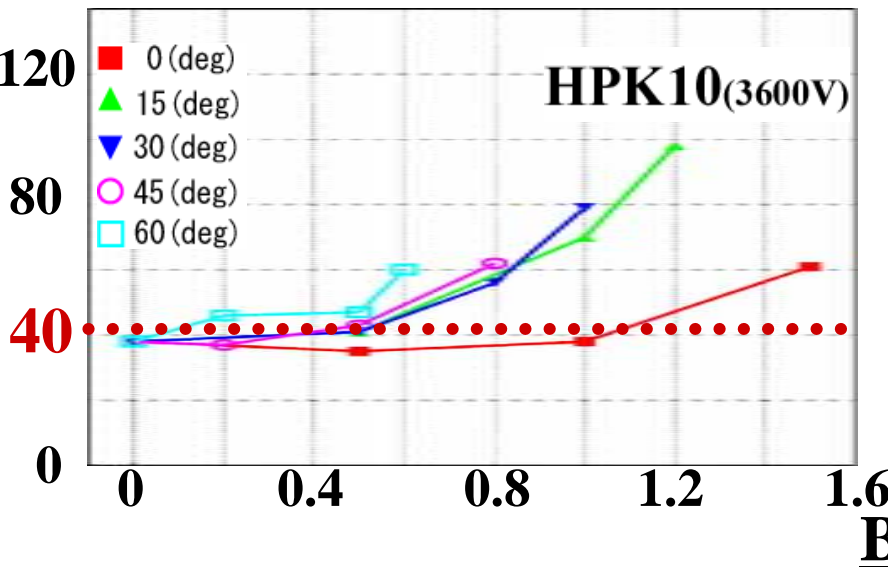
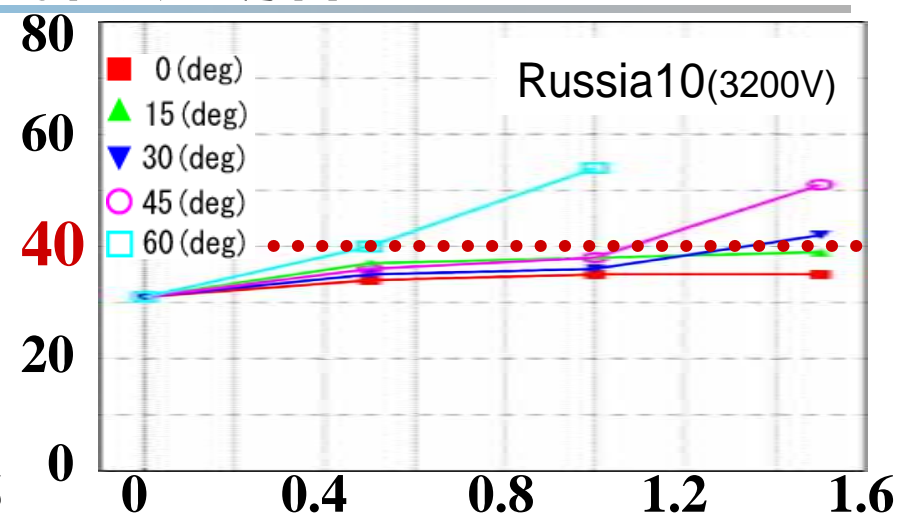
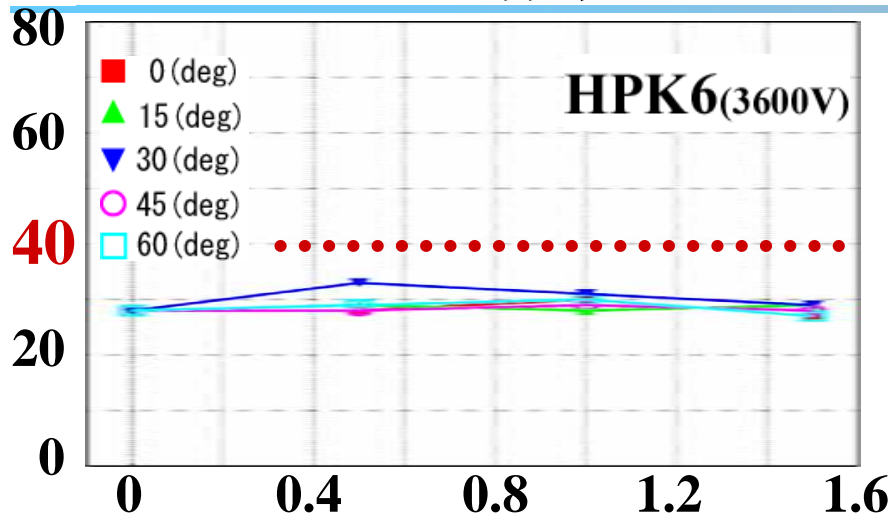
Burle25 : 1.0T以上で**20eV以下**！！

1.0T以上では電子増幅が起こらず測定できない(**実験結果と合致**)



高磁場中では**チャンネル径の小さいMCP-PMT**が有効

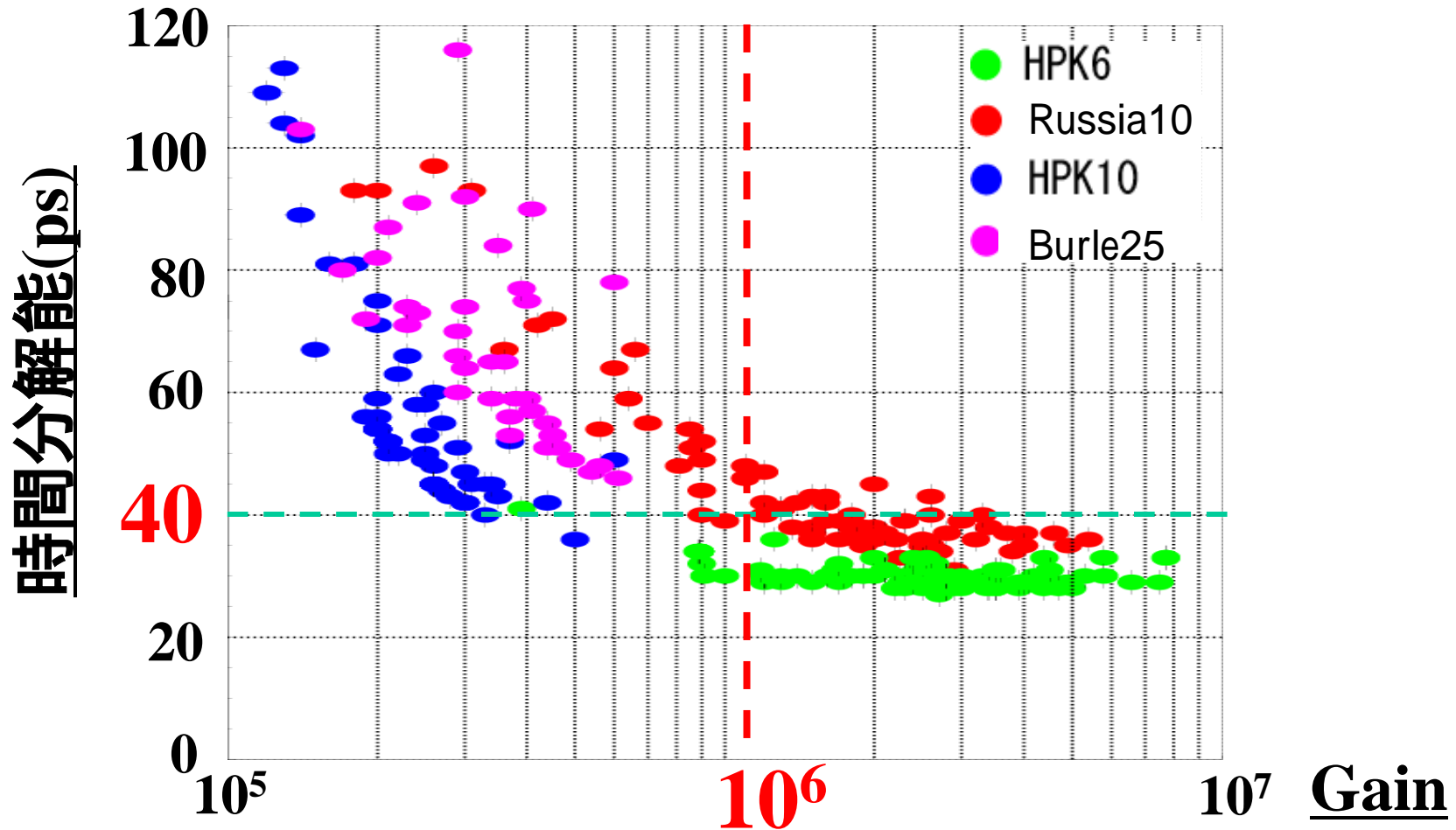
磁場 V.S. 時間分解能



HPK6、Russia10(0 ~ 30) : 高Gain → 30 ~ 40psの高時間分解能
 Gainが低下している測定点 → 時間分解能が悪化

Gain vs 時間分解能

電圧、磁場、角度を変えて測定した全てのデータ



40ps以下の高時間分解能を得るためには、 10^6 以上のGainが必要

収集効率

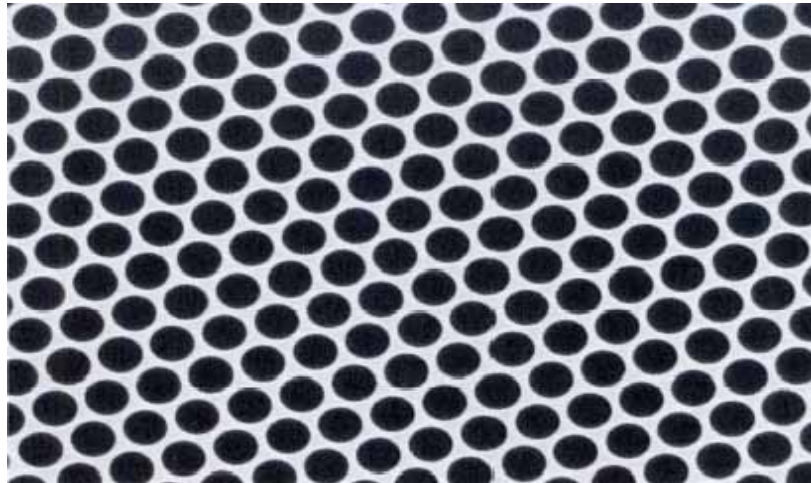
基準PMT: 量子効率、収集効率ともに既知で1光子の信号とノイズが分離できるPMT、H3171-04 (No.LA9806) を使用

→ 同じ光量で測定し比較することにより**収集効率**を導出

収集効率に関わる点

- **開口率**・・・MCP表面の全面積に対するチャンネルの開口面積の比率
- **Al膜**・・・イオンフィードバック防止のためにMCP表面にある(透過率~60%)

MCPの表面:



収集効率－結果－

Russia10(開口率40%,Al膜無)

磁場(0T ~ 1.5T)	平均
収集効率(%)	44

Burle25(開口率30%,Al膜無)

磁場(0T ~ 0.2T)	平均
収集効率(%)	30.5

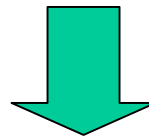
HPK6(開口率60%,Al膜有)

磁場(0T ~ 1.5T)	平均
収集効率(%)	35.5

HPK10(開口率60%,Al膜有)

磁場(0T ~ 1.0T)	平均
収集効率(%)	30.3

開口率(%) \cong 収集効率(%) (Al膜無し)



Al膜がなく、開口率50%以上のMCP-PMT

角型マルチアノードMCP-PMT

仕様の異なる4種のMCP-PMTを用いて、磁場中での性能について研究

高磁場中ではチャンネル径の小さいMCP-PMTが有効
~40psの高時間分解能を得るためには 10^6 以上のGainが必要
MCP表面のAl膜を除くことにより、収集効率が向上する

- 
- 磁場に対する耐性からチャンネル径を $10\ \mu\text{m}$ 以下
 - 高時間分解能を得るためGainを 10^6 以上
 - MCP表面のAl膜無し、開口率を50%以上

光検出器に要求する性能

- (1)1光子が検出可能
- (2)高時間分解能 40 ~ 50ps
- (3)1.5Tの磁場中で使用可能(角度付)
- (4)収集効率 50%
- (5)位置分解能

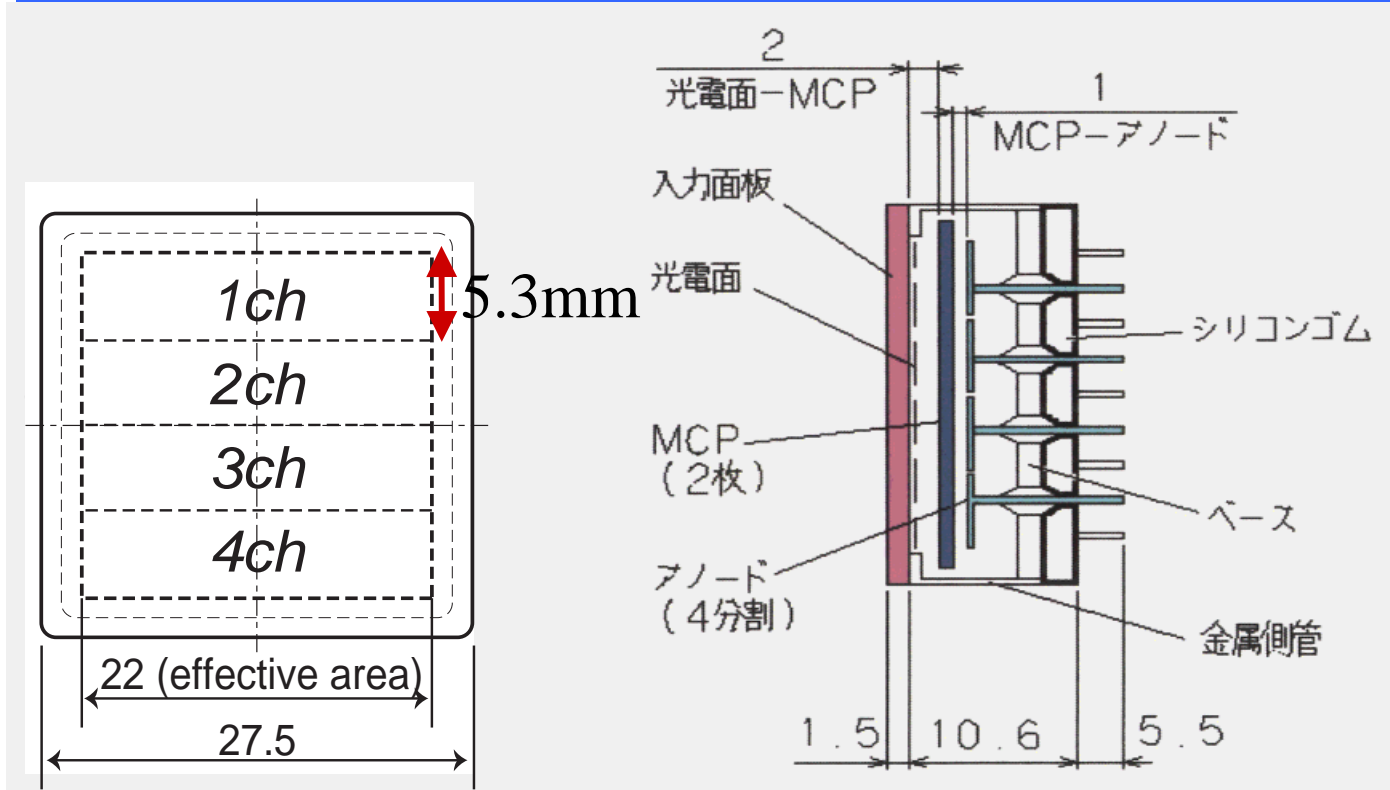
+

リニアアレーのマルチアノード

角型 マルチアノードMCP-PMT 開発

今回浜松ホトニクスと共同開発したMCP-PMT

27.5mm角型MCP-PMTの構造図

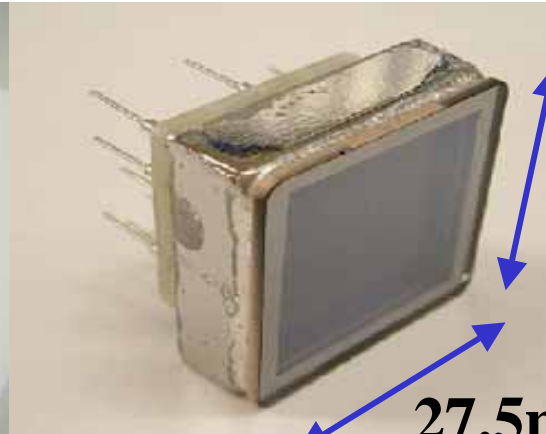


浜松ホトニクス株式会社

2

角型マルチアノード MCP-PMT仕様

概観



27.5mm

27.5mm

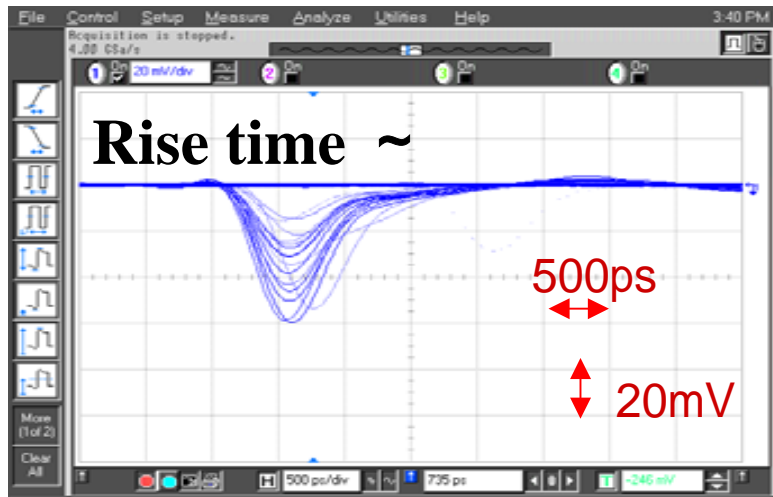
角型MCP-PMTの構造の特徴

- MCPのチャンネル径 $10\ \mu\text{m}$
 - MCPの厚さ $400\ \mu\text{m}$
 - MCP-MCP間 $30\ \mu\text{m}$
 - MCP枚数 2枚
 - 最大印加電圧 3.5kV
 - リニアアレーの4チャンネルアノードPMT
 - MCP開口率 60%
 - MCP表面のAl膜(イオンフィードバック防止)なし
 - 有効光電面の領域 72%
 - 光電面 マルチアルカリ(最大QE:19.5%, $\lambda=350\text{nm}$)
- Gain, 時間分解能
- 位置分解能
- 収集効率
- Dead spaceの減少

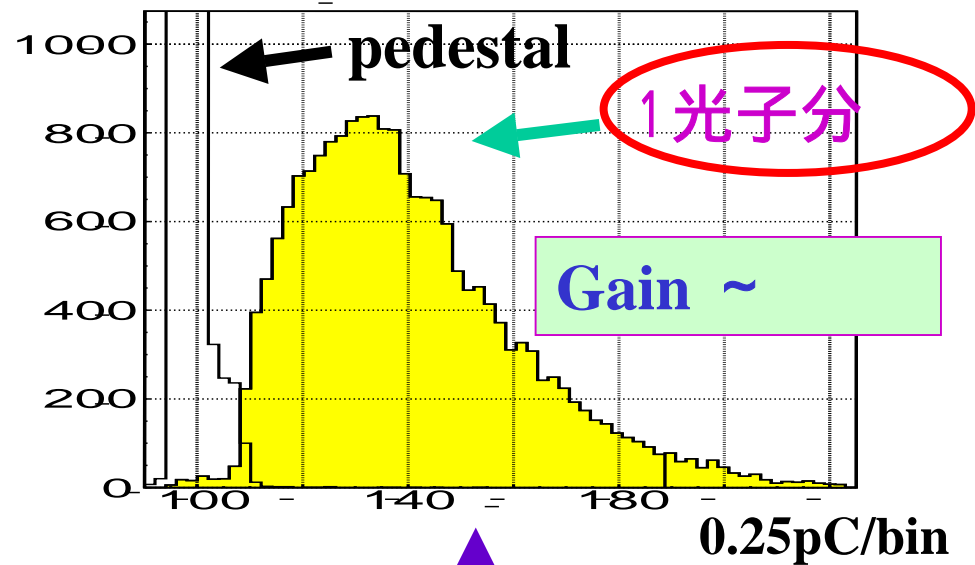
基本性能 (B=0T, HV:3.5kV)

1光子照

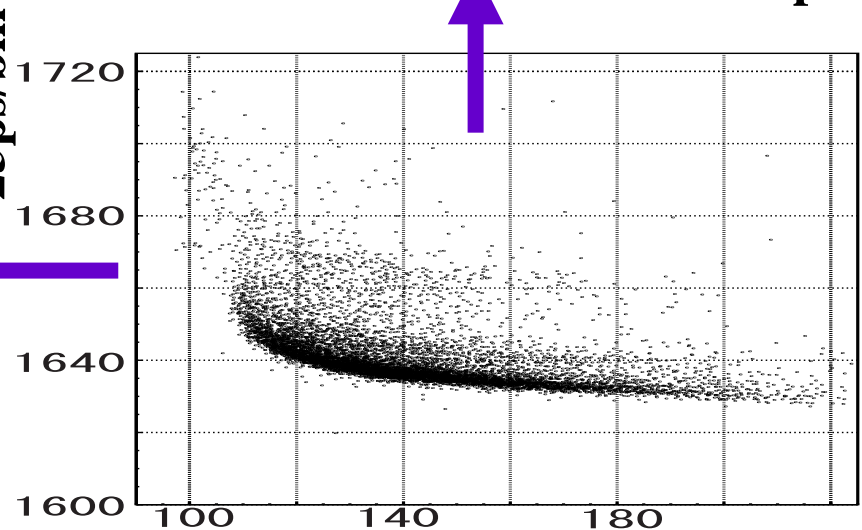
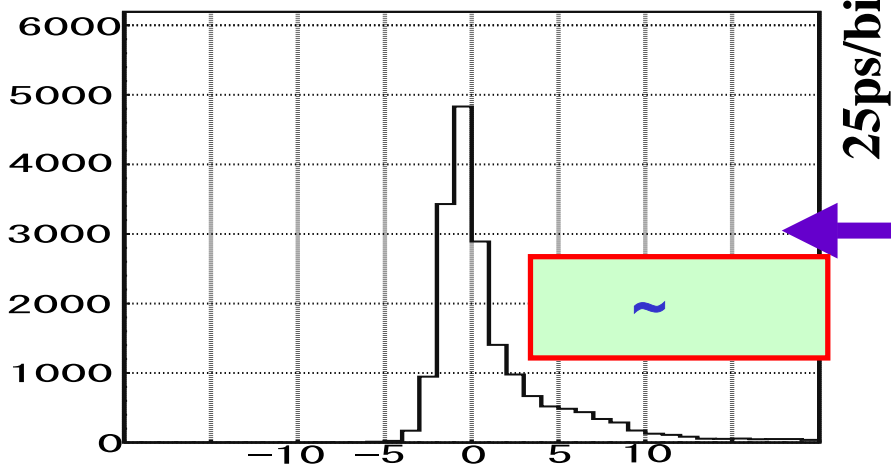
波



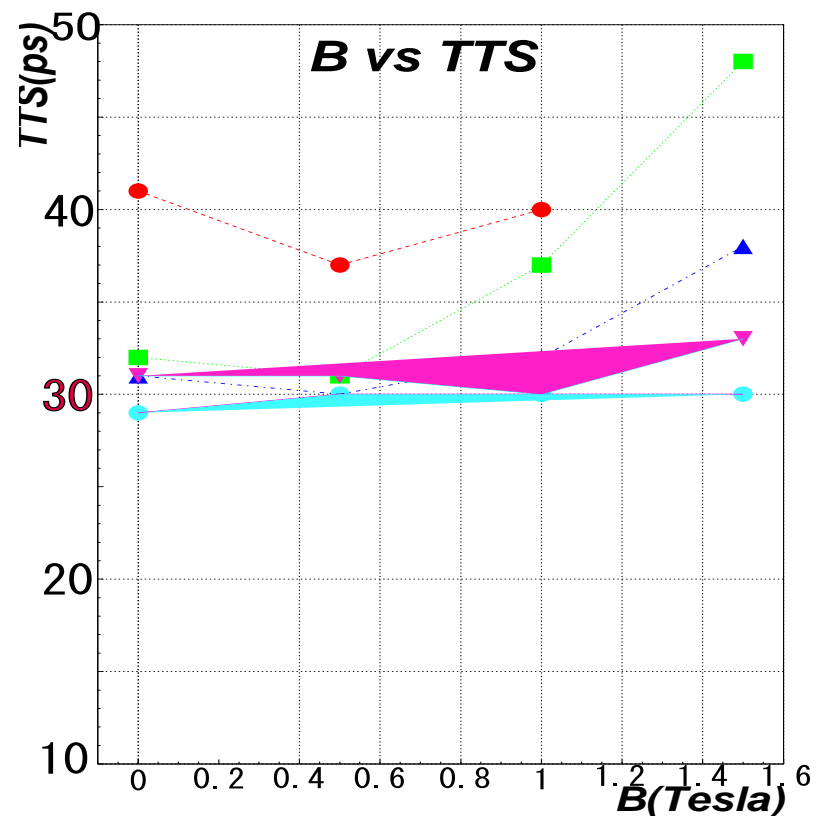
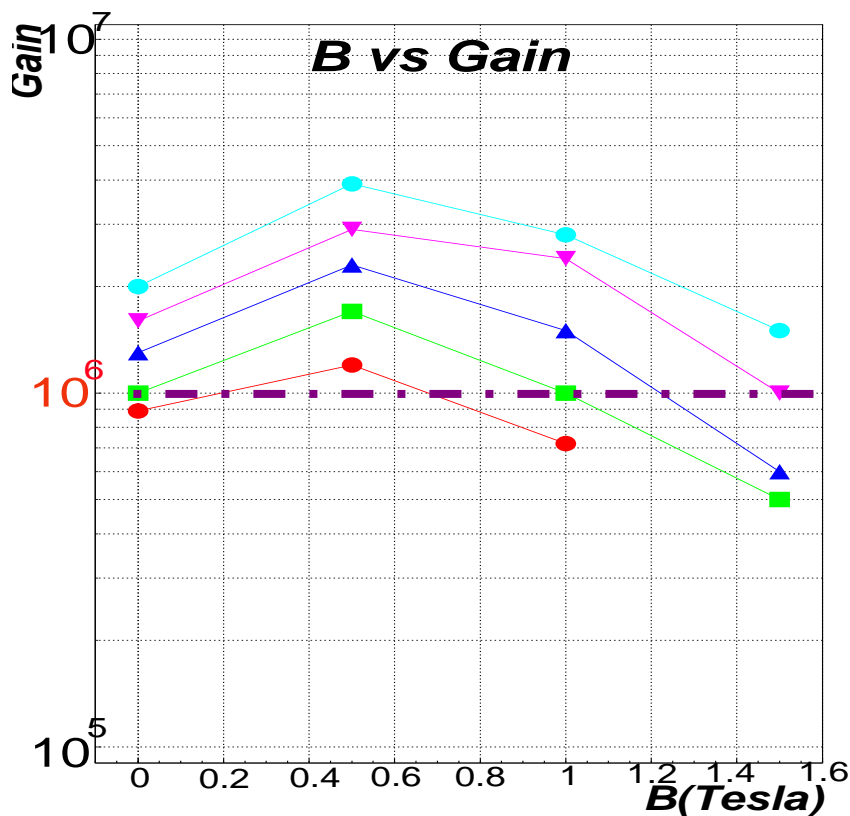
ADC分



TDC分



B v.s. Gain ,時間分解能



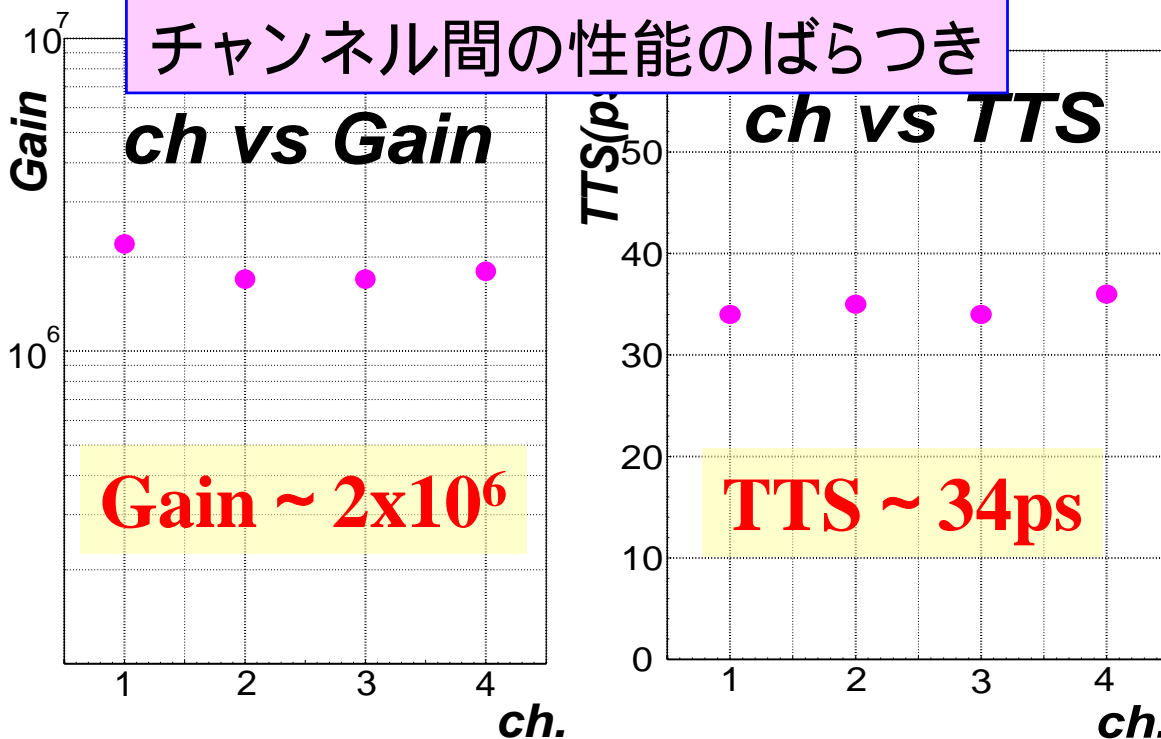
磁場に対するGain, TTS

- 最大電圧 (3.5kV)では、 $B=1.5T$ でも 10^6 以上のGainが得られる
- 10^6 のGainが得られれば磁場に対して時間分解能が悪化する振る舞いは見られない

角型マルチアノードMCP-PMTの性能

•Gain, 時間分解能, 収集効率 (1光子照射)

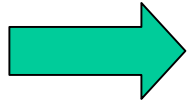
B(T)	0	1.5
Gain	2×10^6	1.5×10^6
時間分解能(ps)	29	30
収集効率(%) (QE=0.18)	56%	—



4チャンネル全てで
同じ性能が得られる

まとめ

- 仕様の異なる4種のシングルアノードMCP-PMTの、磁場中での性能について研究



チャンネル径を10 μ m以下
Gainを 10^6 以上
MCP表面のAl膜無し、開口率を50%以上

- TOP counter用のリニアアレーマルチアノードMCP-PMTを開発し、性能評価を行った。

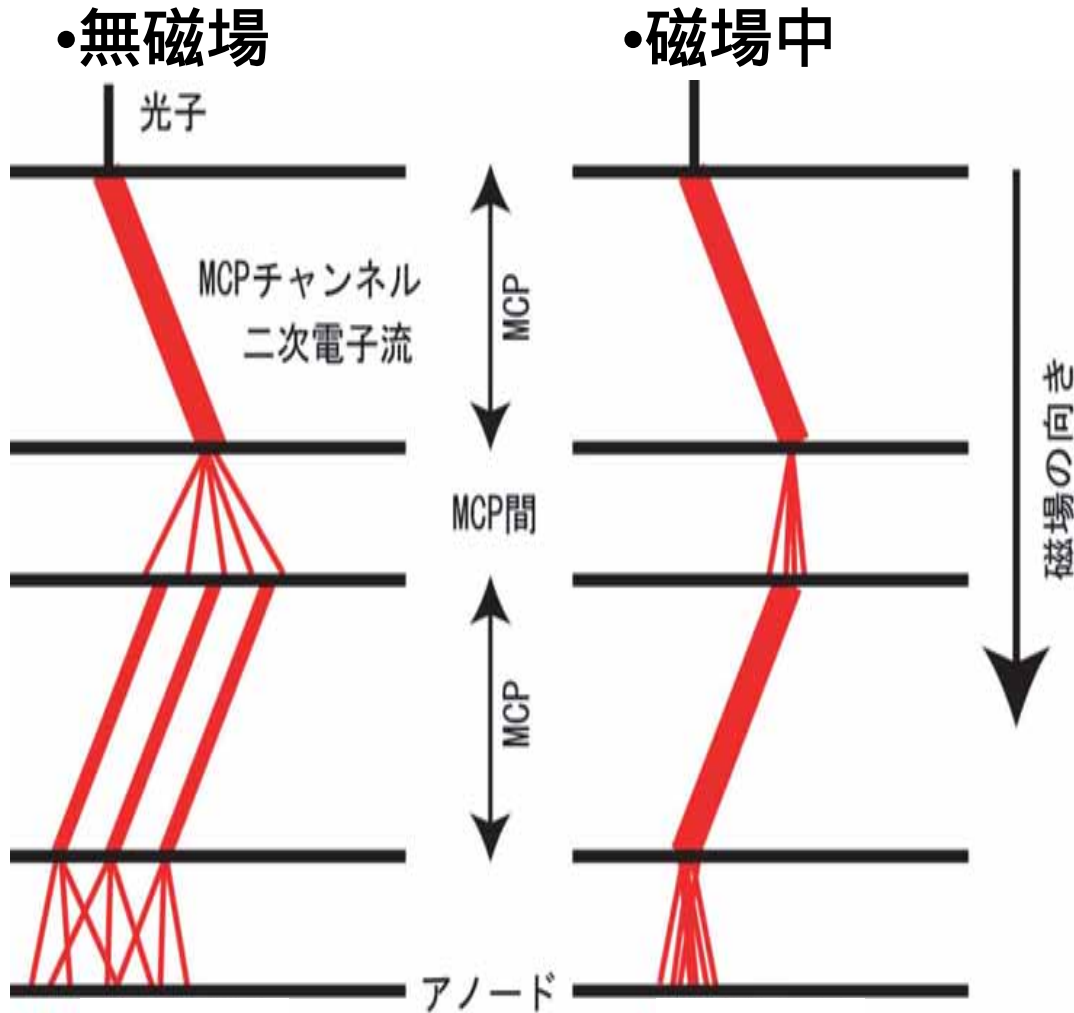
1. 1光子検出可能
2. 1光子での時間分解能 ~ 30 ps
3. 磁場中で使用可能($B=1.5$ T)
4. 収集効率 50%
5. 位置分解能 ~ 5 mm

今回開発した角型マルチアノードMCP-PMTは期待通りの性能を示した

Back up

波高分解能の向上

•無磁場、磁場中でのMCP中の2次電子流



無磁場 → 広がり大

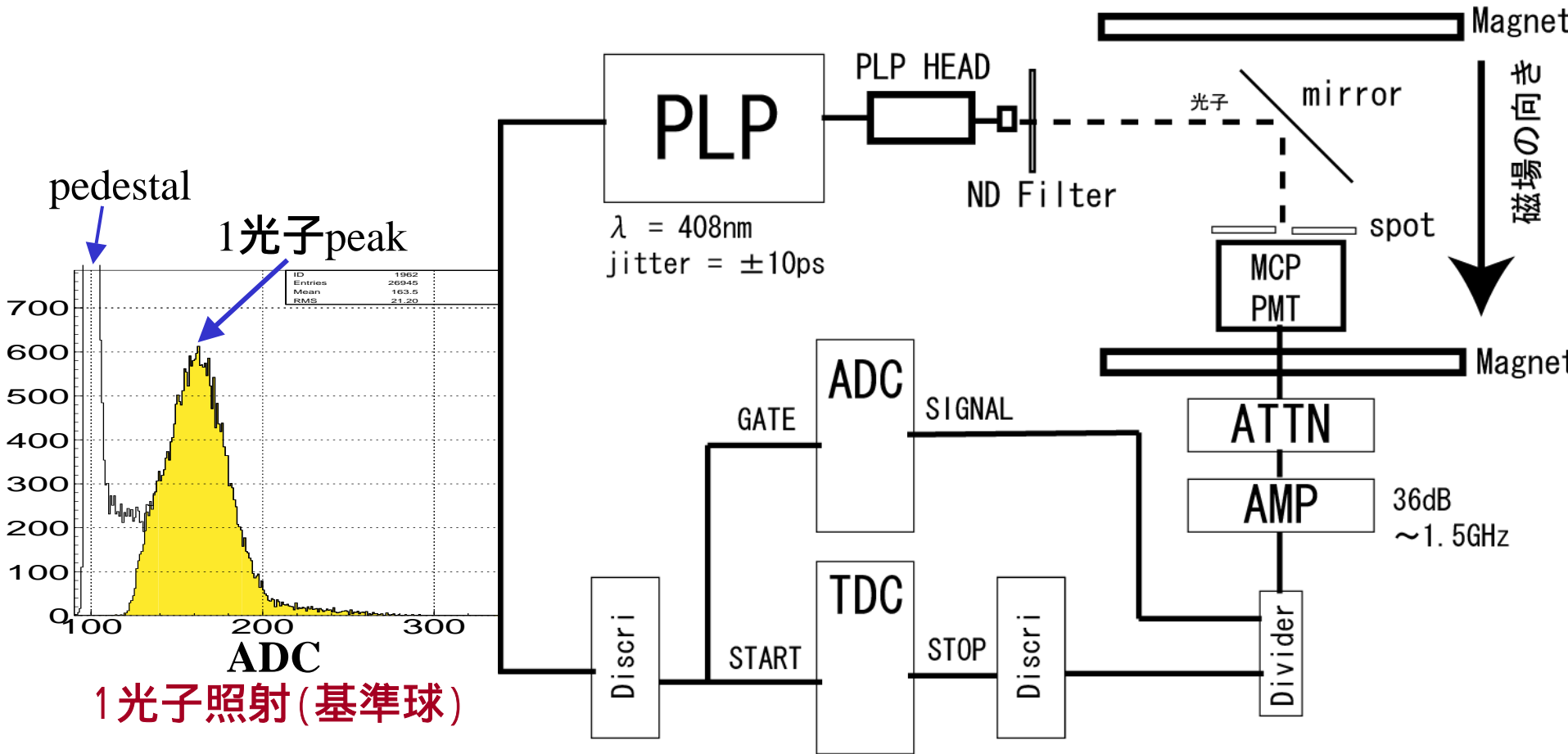
磁場中 → 広がり小

↓
少数のチャンネル

↓
飽和特性

↓
波高分解能向上

SET UP@KEK-PS



HPKco. PLP

波長 408nm
ジッター $< \pm 10\text{ps}$

AMP

HPKco. amp
Gain $\cdots 36\text{dB}$

CAMAC module

ADC $\cdots 0.25\text{pC/count}$
TDC $\cdots 25\text{psec/count}$

(~ 63 倍)

収集効率－考察－

HPK6、HPK10 : **AI膜が蒸着**

AI膜の透過率 ~ 60%、開口率60%  収集効率 ~ 36%

AI膜が収集効率を低下させる

光検出器に要求する性能 (4)収集効率 50%

 AI膜が蒸着されている場合、開口率が80%以上必要 : 不可能
AI膜が無いRussia10は高Gain、高時間分解能

(イオンフィードバックによる悪影響はない)

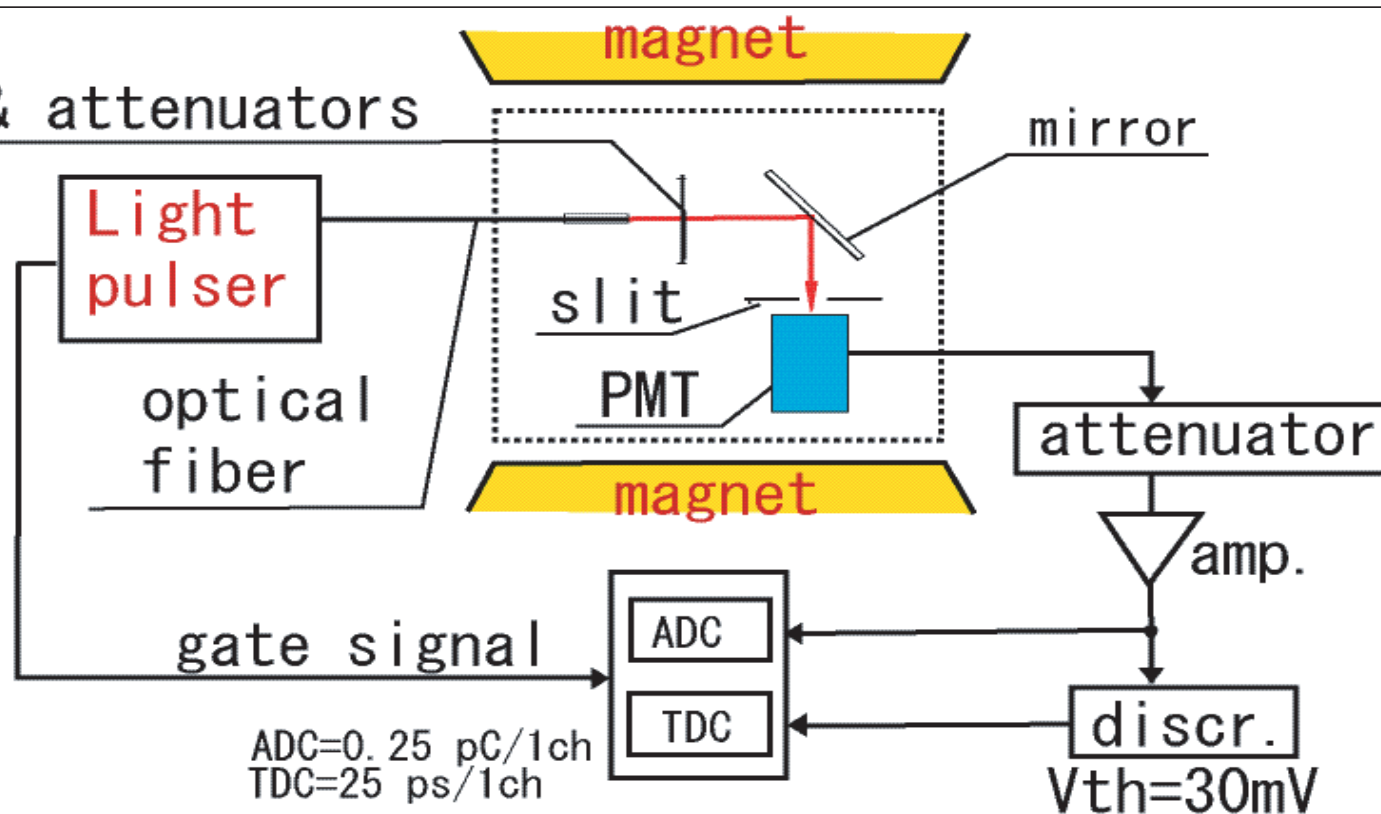
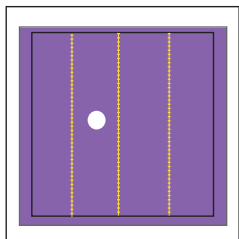


AI膜蒸着がなく、開口率50%以上のMCP-PMT

Set up@HPK

1光子照射
2ch SPOT照射
 (1mm)

spot照射 (Ch2)

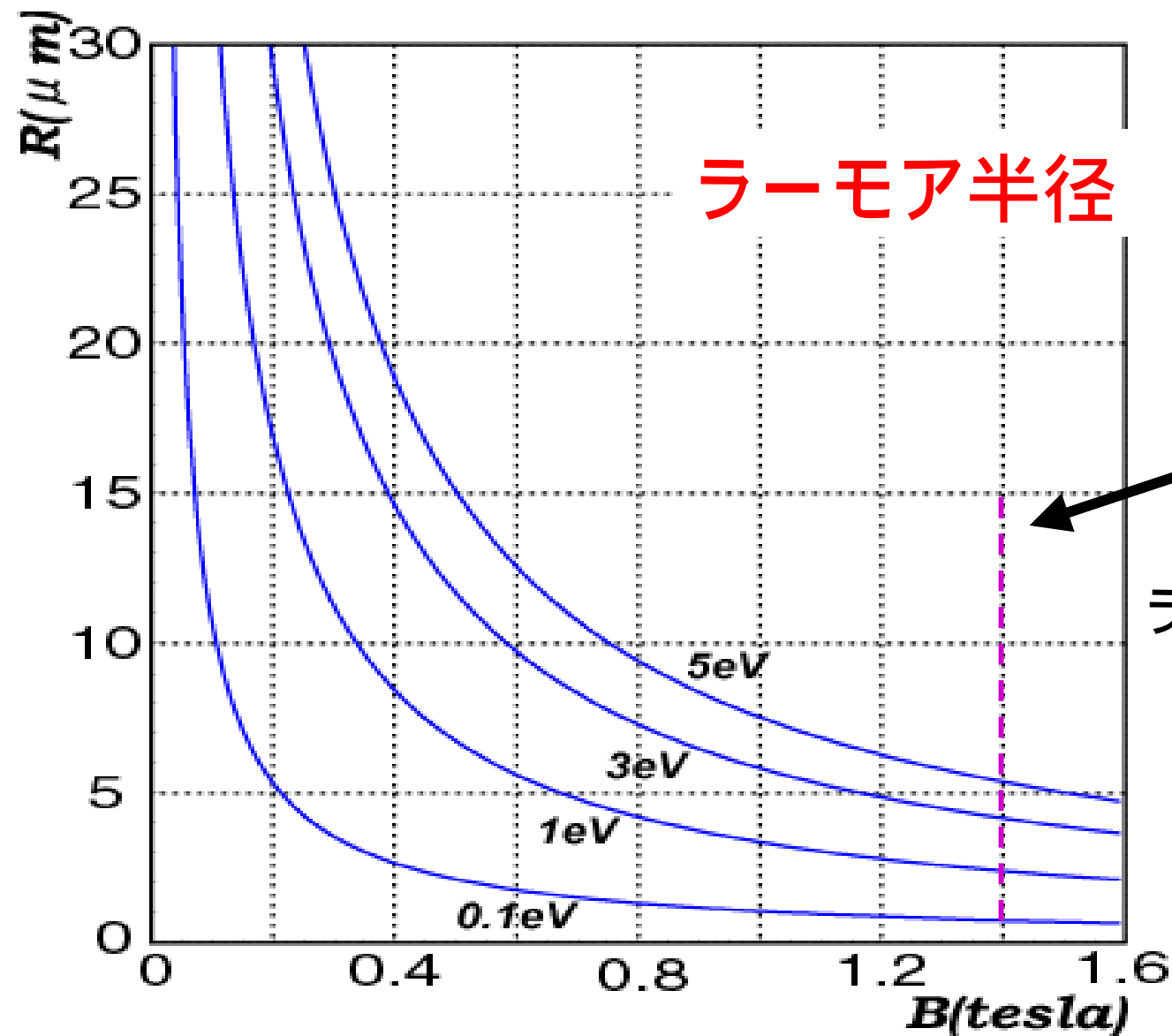


HPKco. PLP(C4725)
 波長 ... 408nm
 jitter ... $< \pm 10\text{ps}$
 Pulse 幅 ... $< 50\text{ps}$

Amp
 HPKco. Amp(C5594)
 Gain ... 36dB
 帯域 ... $\sim 1.5\text{GHz}$

CAMAC
 ADC ... 0.25pC/count
 TDC ... 25psec/count

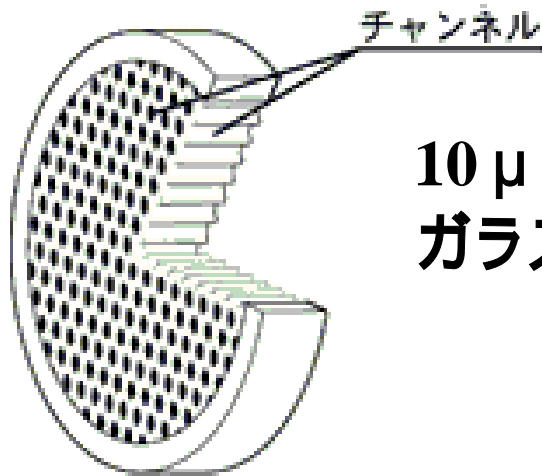
ラーモア半径



B=1.5T
ラーモア半径 $\sim 3.9 \mu\text{m}$
(3eV)

位置分解能の原理

MCP(Micro-Channel Plate)



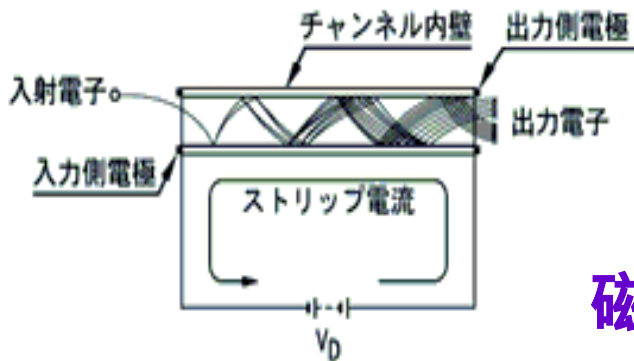
10 μm の細いガラスパイプの集合体
ガラスパイプそれぞれが独立した二次電子増倍器



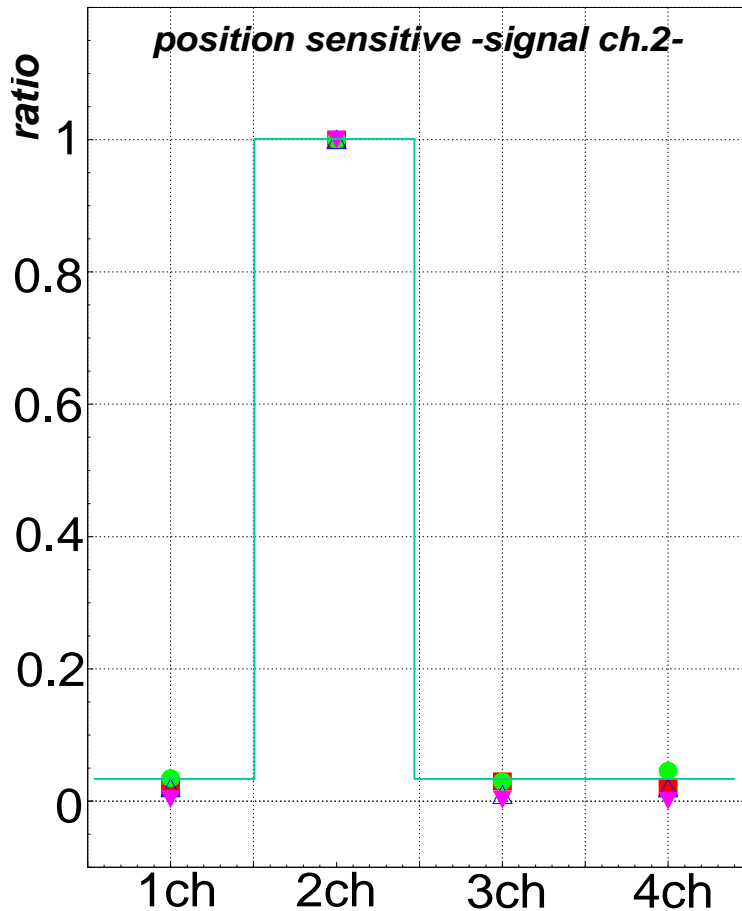
あるチャンネルに入った電子は
必ず同じチャンネルから出る



磁場の有無とは無関係に位置分解能がある



位置分解能



2ch, SPOT, 1光子照射
(1mm)

他chへのsignalのしみだしは
見られない。
(磁場:0,0.5,1.0,1.5T)

磁場に依存せず位置分解能がある。

磁場に対する位置分解能

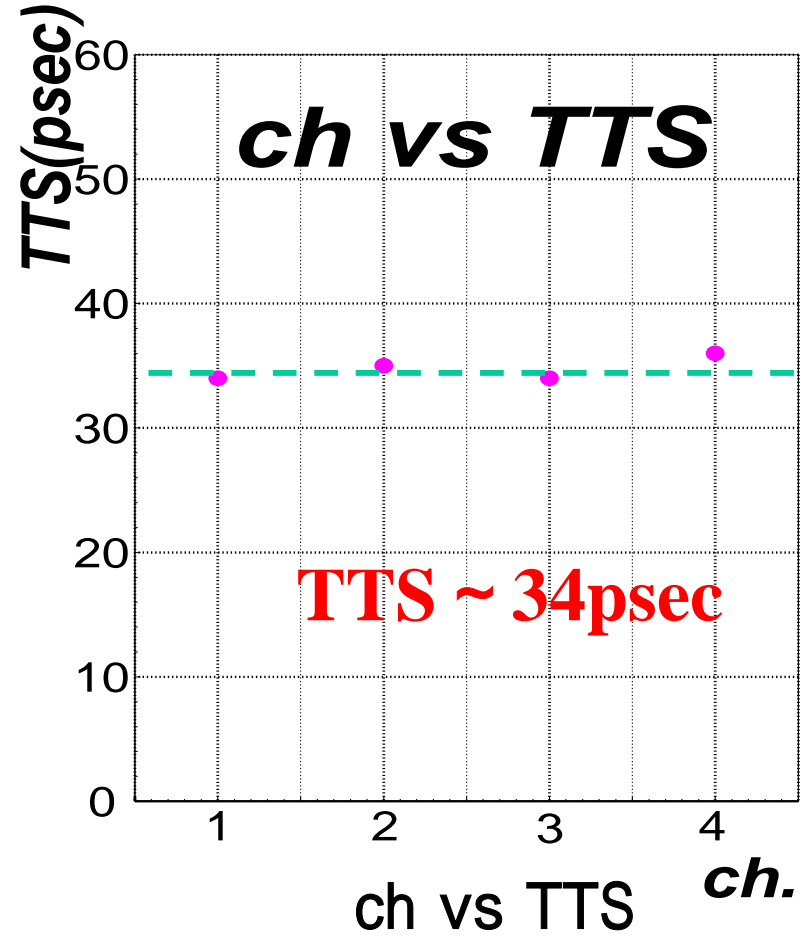
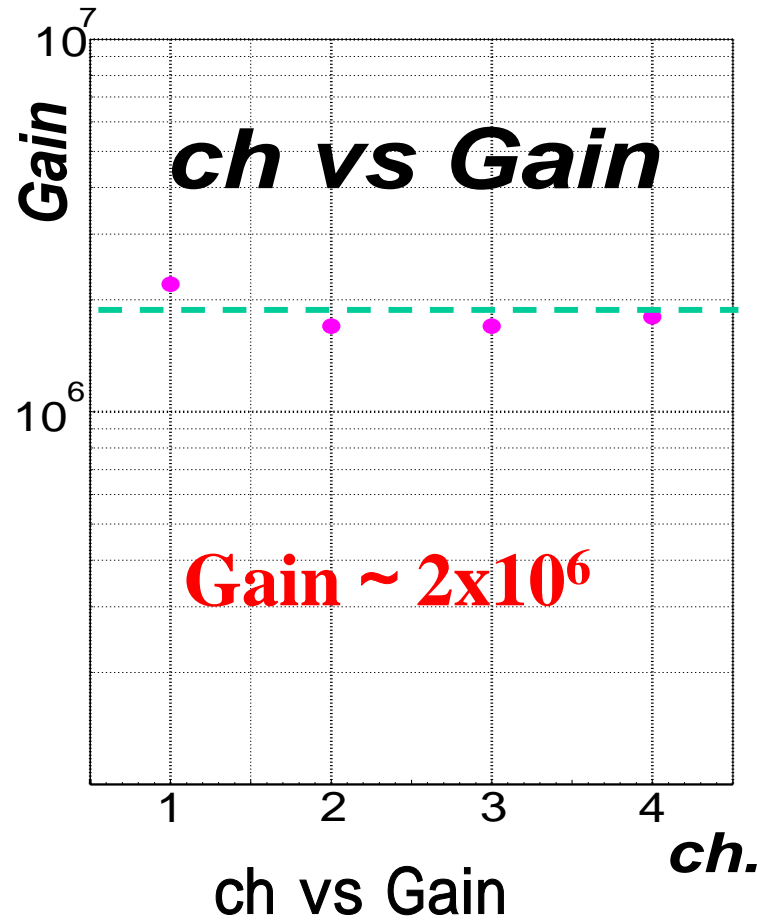
■ 位置分解能は5mm以下 (アノードのチャンネルサイズ)

チャンネル間の性能のばらつき

HV:3400V , 1光子照射

チャンネル間に性能のばらつきはない。 →

どのチャンネルでも
同じ性能が得られる



イオンフィードバックについて

イオンフィードバックの影響

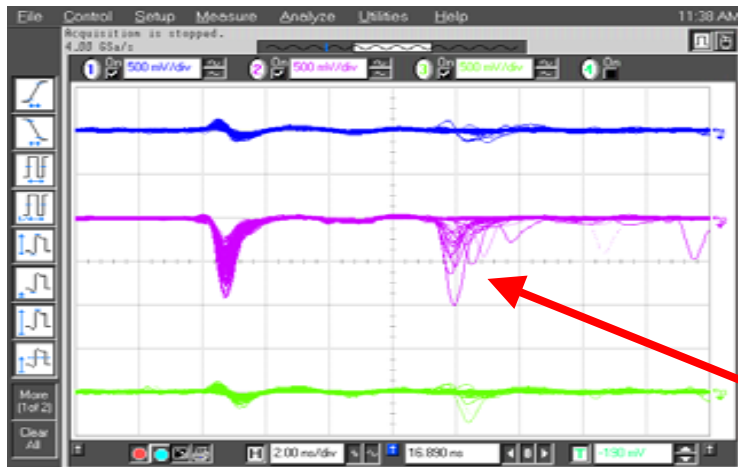


光電子増倍管内の残留ガスが電子によりイオン化され、この内の陽イオンが光電面に戻ること(イオンフィードバック)により多数の光電子を発生させる。



アフターパルス

(通常、本信号から数十ns ~ 数 μ s遅れる)



今回のPMTも**複数光子照射**すると、約**十ns**にアフターパルスが見える。
(原因がイオンフィードバックかは分かっていない)

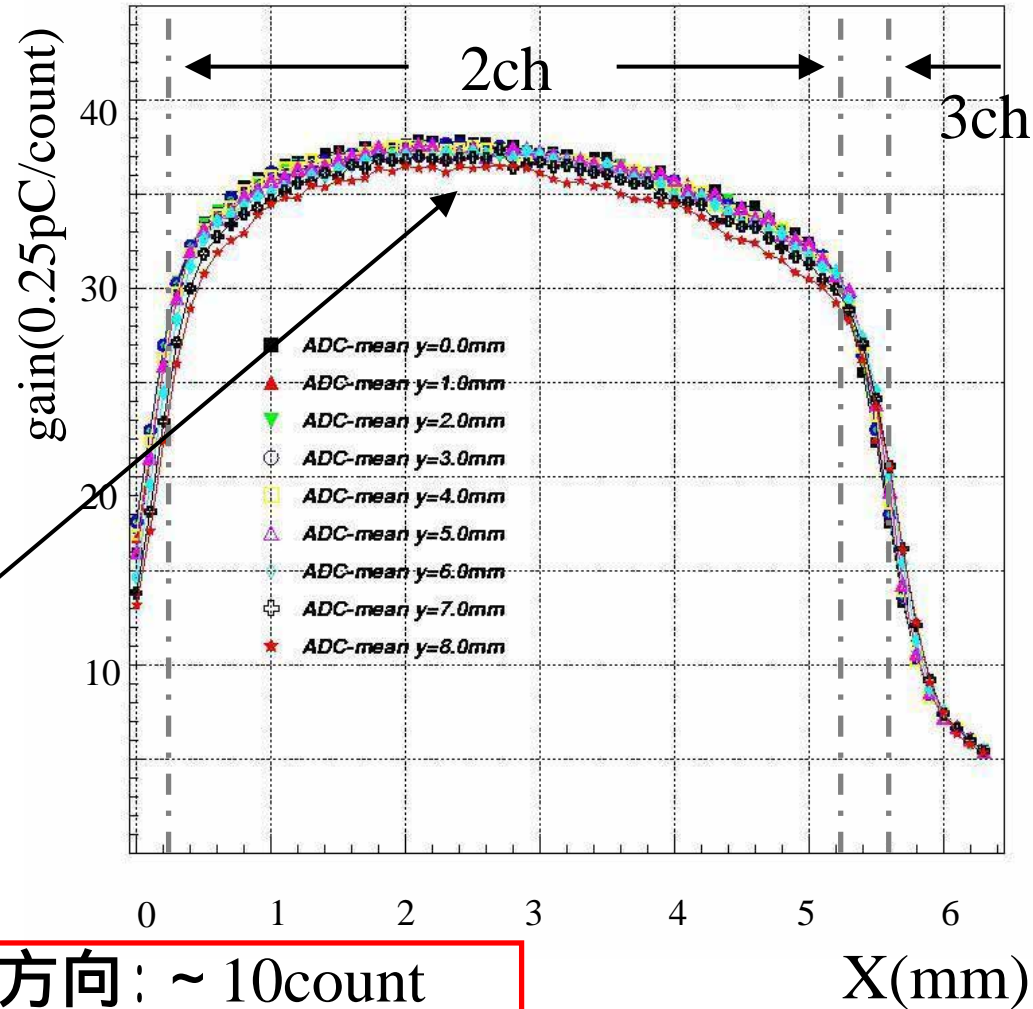
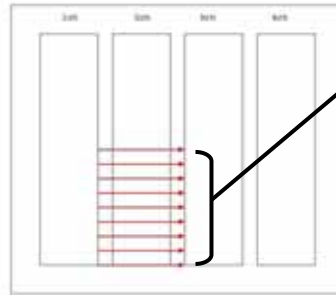
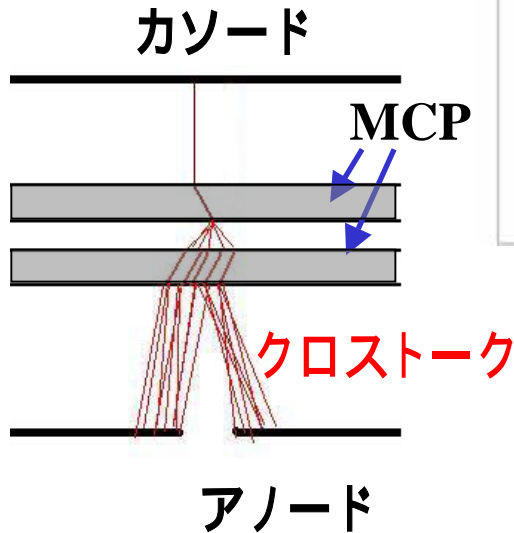
しかし、1光子照射では新品であることもありアフターパルスは
見えない。 → **時間分解能に悪影響はない**

角型マルチアノードMCP-PMT

2chのgain

- ch上に光が入射
-10カウント以内(XY方向)
- ch以外の所に光が入射
-L16同様電荷が検出

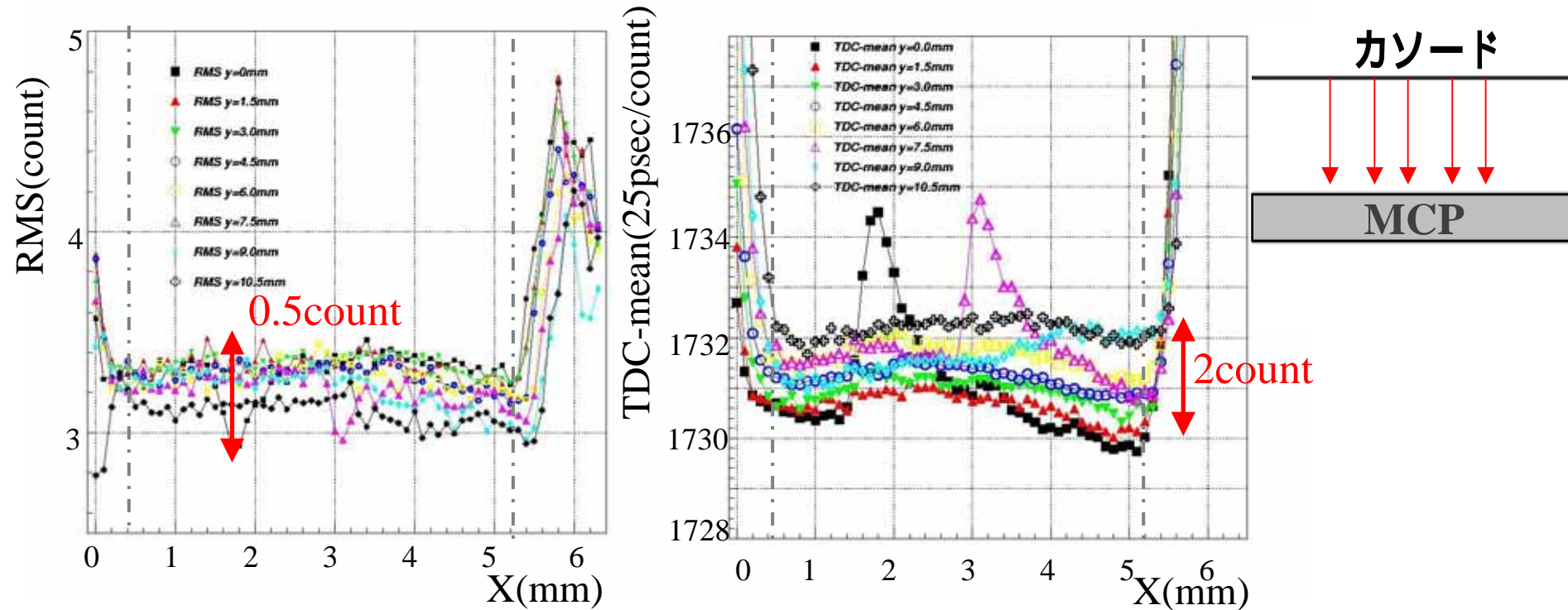
増幅電子が2つのアノードに
またがって検出



gain $\left[\begin{array}{l} \text{X方向} : \sim 10\text{count} \\ \text{Y方向} : \sim 2\text{count} \end{array} \right.$

角型マルチアノードMCP-PMT

2chのTDCのRMSとTDC-mean



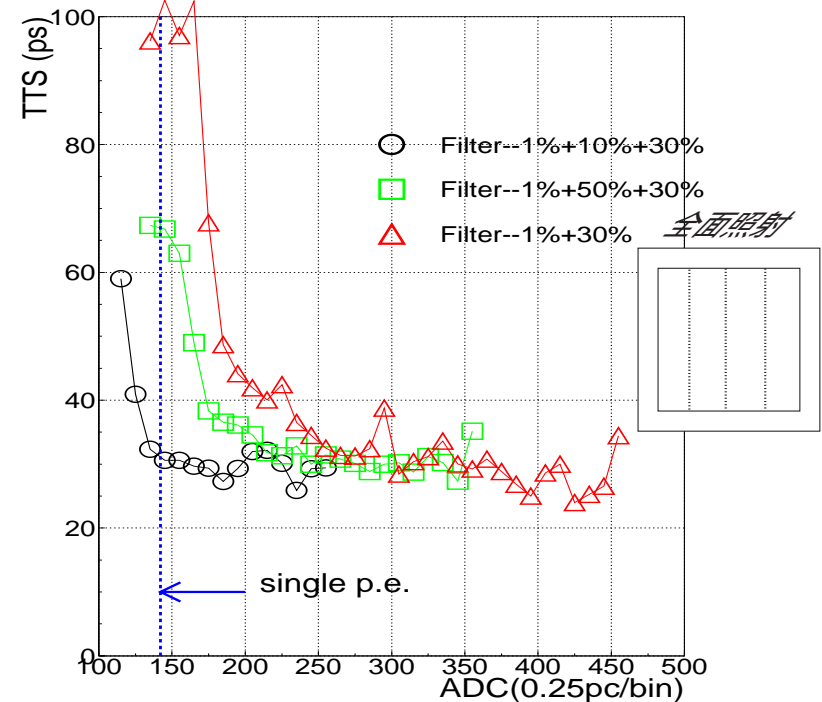
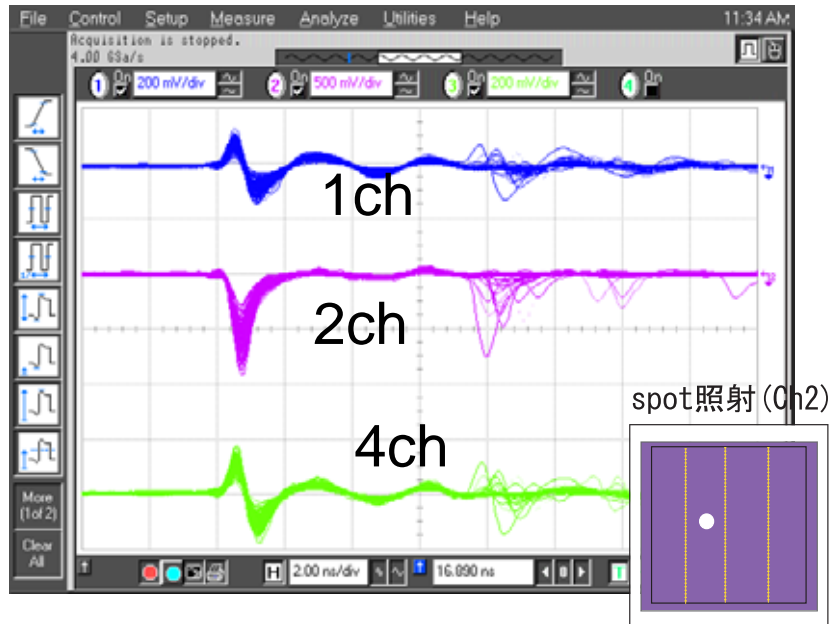
- RMSは場所によらず 0.5count以内
- カソード、MCP間の距離が一定

TDC-meanの場所によつてのふらつき小 (~ 2count)

➡ チャンネル全体で時間分解能は変化なし
(spot: ~ 35psec, all: ~ 35psec)

今後の課題

・Cross Talk



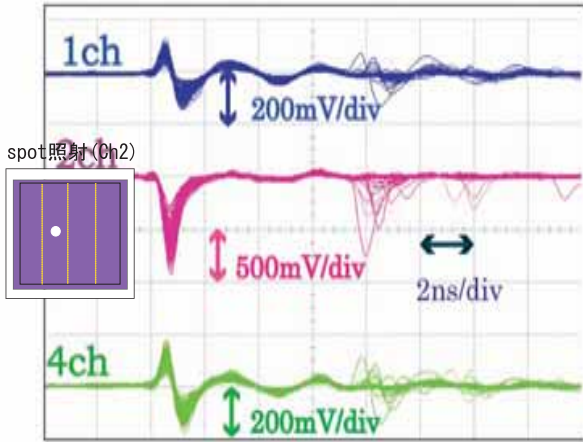
$$\frac{S}{N} = \frac{\text{本信号のpulse-height}}{\text{Cross-talkのpulse-height}} = \frac{750\text{mV}}{150\text{mV}} = 5$$

Cross-talkが本信号に対して、非常に大きい。



今後の課題

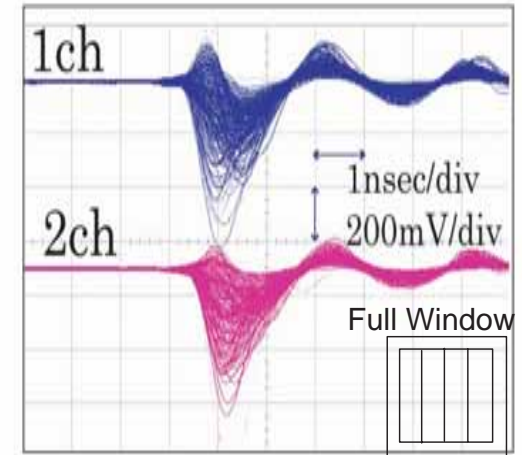
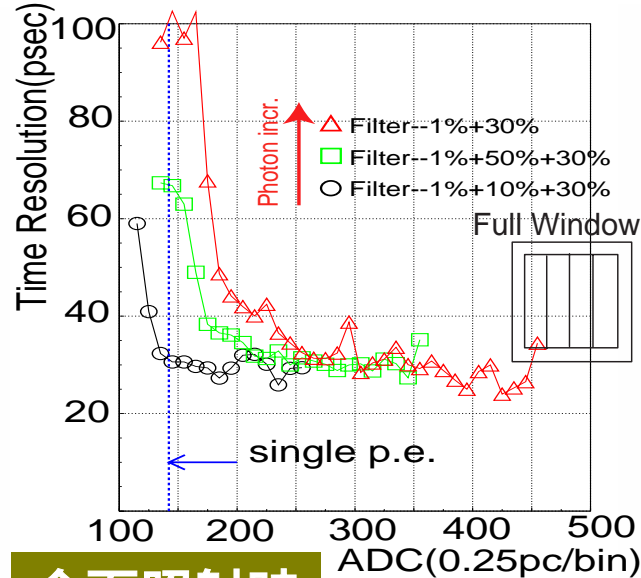
Cross-talk



クロストーク波形の特徴

- 本信号に対して極性が反転
- 全てのチャンネルで発生
- S/N ~ 3 - 5

$$S/N = \frac{\text{本信号のパルスハイト}}{\text{クロストーク信号のパルスハイト}}$$



全面照射時

PMTあたりの光量を増加 (~ 数光子)



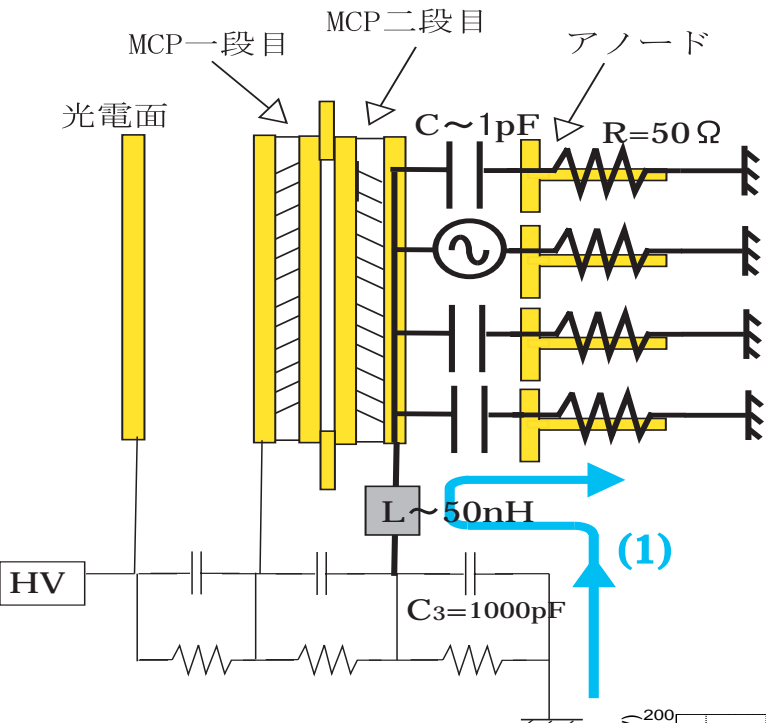
一光子に対応するADC countでの
時間分解能の悪化(30psec 70psec 90psec)



本信号と他チャンネルから生じるクロストークが同時に発生する確率**増加**

今後の最重要課題

Cross-talk 原因調査



原因

- R:読み出し回路系のインピーダンス(50 Ω)
- L:電源供給ラインのピンによるインダクタンス(~ 50nH)
- C:MCP二段目out-アノード間のキャパシタンス(~ 1pF)

により(1)の経路でRLC回路を構成

原因

Signal出力時にMCP二段目out全体が(a)式の解で振動



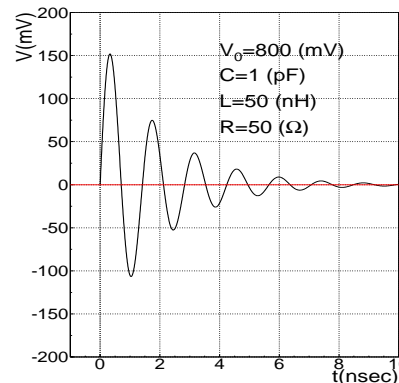
クロストーク発生の根本となる致命的な部位

$$I(t) = RI + \frac{Q}{C} + L \frac{dI}{dt} = V_0$$

$R^2 < 4L/C$ の時、振動解

$$I(t) = \frac{2V_0}{\sqrt{4L/C - R^2}} \exp\left(\frac{-R}{2L}t\right) \sin\left(\frac{\sqrt{4L/C - R^2}}{2L}t\right)$$

(a)



式(a)にパラメータを代入した時の計算によるクロストーク波形の再現

Cross-talk 対策

クロストークの完全除去に挑戦

L,Cを完全に無くすことは不可能(原因)

各ChでMCP蒸着電極とプリーダ回路を分割(原因)

他のチャンネルにSignalによる電位の振動が伝わらない

クロストーク完全除去！！

現在試作・性能試験中

-課題-

- 隣り合うアノード間・MCP電極間のキャパシタンス
 - 各チャンネル共通なHV供給源
- によりクロストークが有意に起こる可能性がある

今後より深い考察と回路シミュレーションが不可欠

