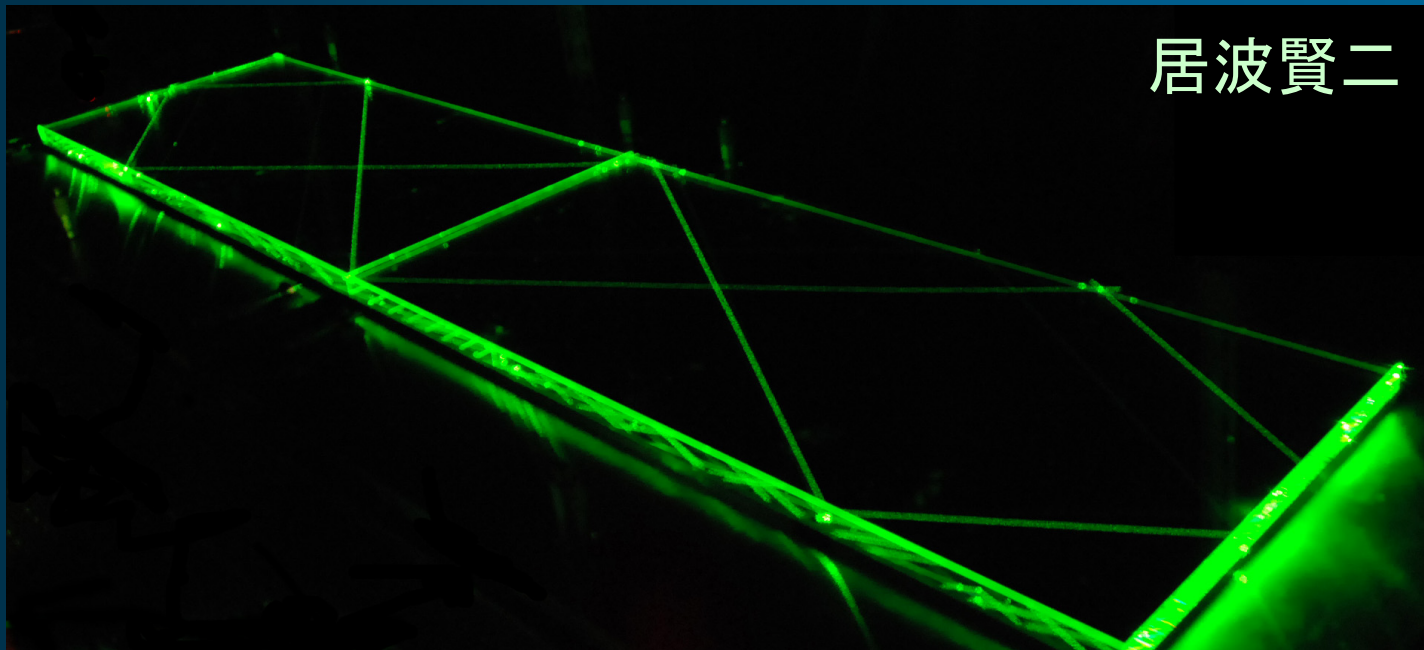
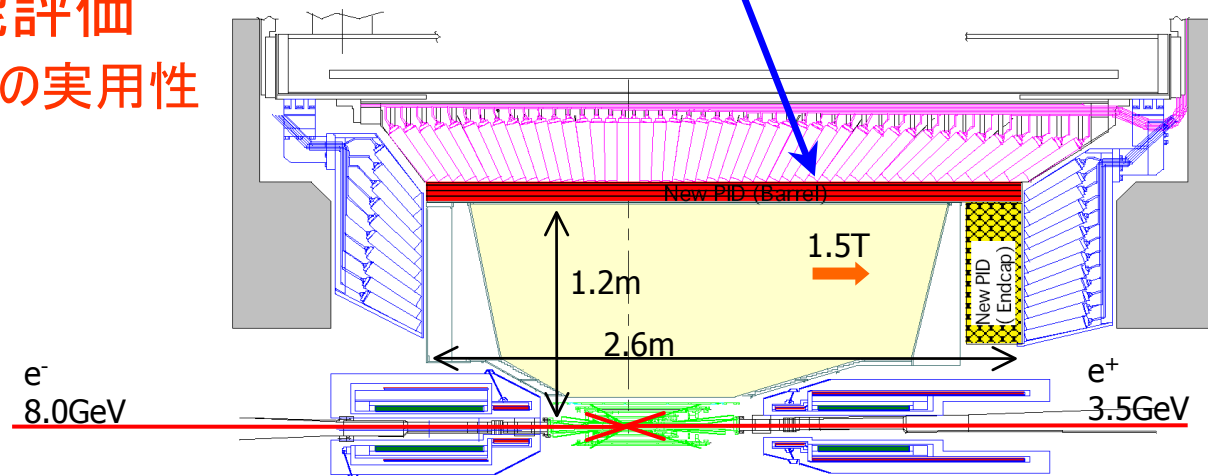


検出器開発(TOP counter)



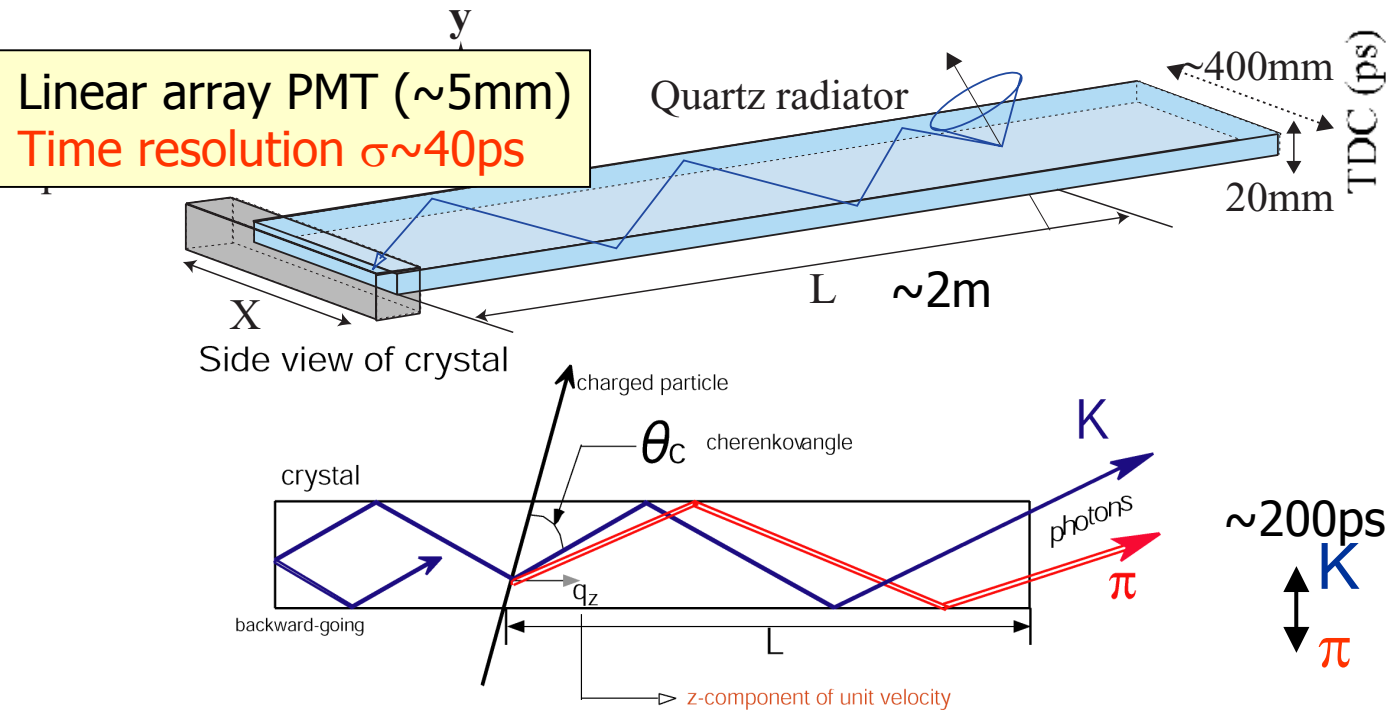
- TOP (Time Of Propagation) counter開発
 - 次世代Bファクトリー実験のための粒子識別装置
 - $L_{\text{peak}} \sim 8 \times 10^{35} / \text{cm}^2 / \text{s}$, Bファクトリーと比べ、40倍の強度
 - K/ π 識別効率の向上
 - Physics analysis, Flavor tag, Full reconstruction

- TOPカウンターの原理検証
- 実用化のための性能評価
 - 光検出器MCP-PMTの実用性



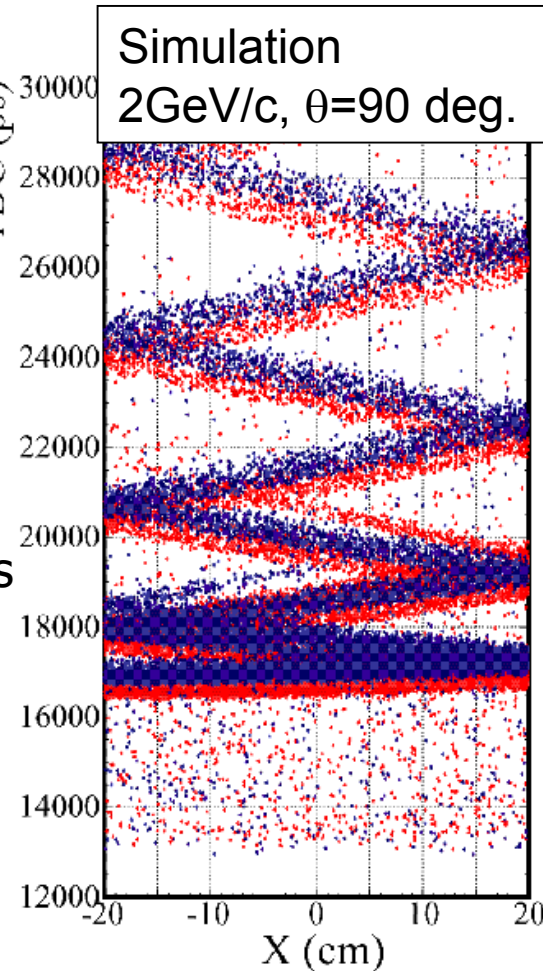
Side view of **Belle II** detector

- チェレンコフ光の到着位置+時間
 - コンパクト

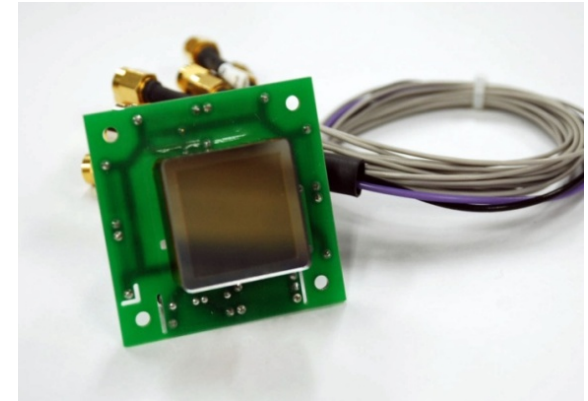


同じ運動量の粒子に対して異なる開き角
 → 異なる伝播距離 (= 伝播時間)

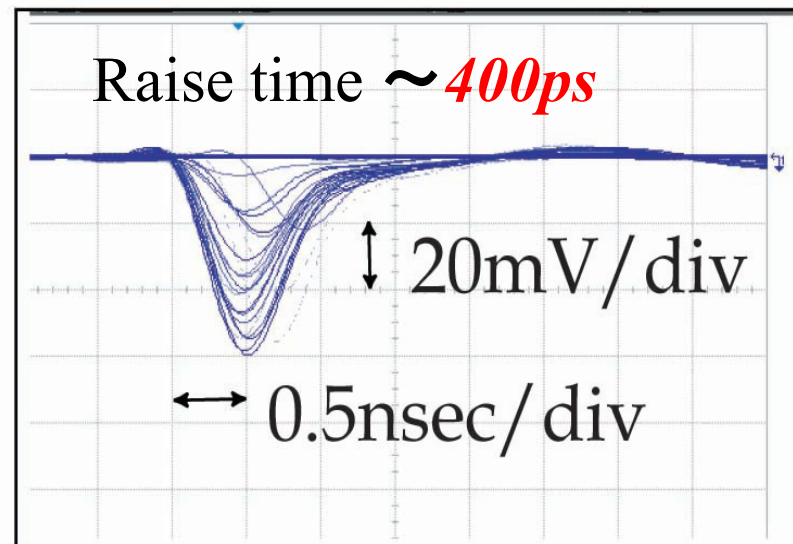
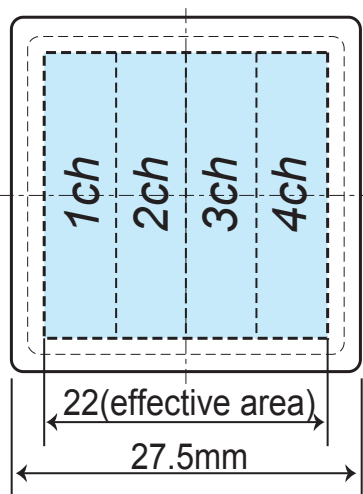
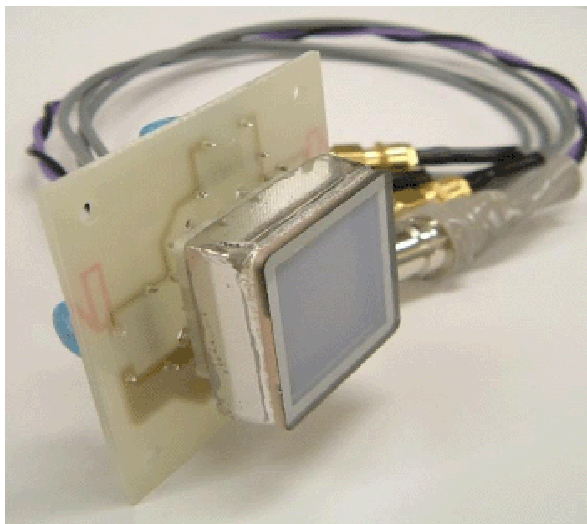
+ 衝突点からのTOFも加算的に識別に寄与



- MCP-PMT
 - 実用化に向けた寿命向上
 - 光電面の劣化メカニズムから対策案
 - 量子効率改良
 - GaAsP光電面
 - Super Bialkali光電面
- プロトタイプ
 - 大型石英 + MCP-PMT
 - ビームテスト
 - 色分散効果の検証(2008/6,12)
 - フォーカスマラーの動作検証(2010/11)
- 実用化に向けた開発
 - Belle-II搭載へ向けた形状最適化
 - 構造体開発
 - 放射線耐性

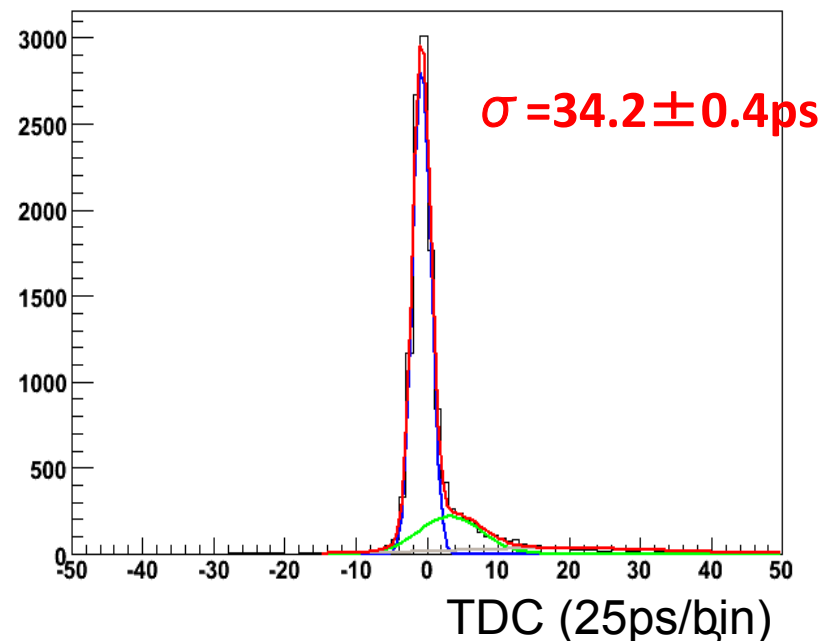


角型MCP-PMT



R&D with Hamamatsu

- Large effective area 64%
- Position information 4ch (5mm pitch)
- Single photon detection
- Fast rise time: $\sim 400ps$
- Gain: $>1 \times 10^6$ at $B=1.5T$
- T.T.S.(single photon): $\sim 35ps$ at $B=1.5T$
- Position resolution: $<5mm$



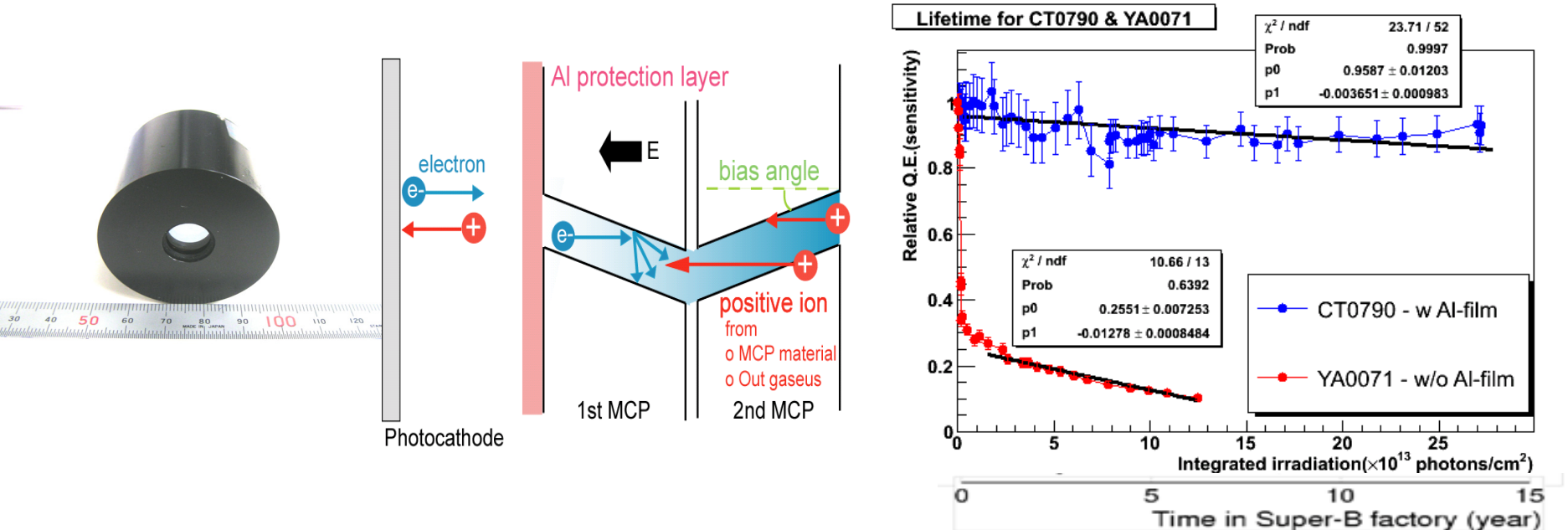
MCP-PMT寿命

- 現在のBelle実験の20倍のバックグラウンド環境に耐えうるPMTが必要

	Belle	Belle-II
Luminosity (/cm ² /s)	1×10^{34}	8×10^{35}
Num. of detected photons (/cm ² /s)	3400	68000
Output charge (mC/cm ² /year)	~6	~120

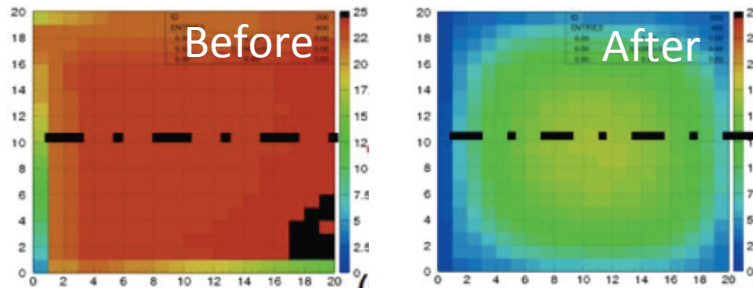
- 丸型MCP-PMT

- アルミ保護膜を導入することで、十分な寿命を達成



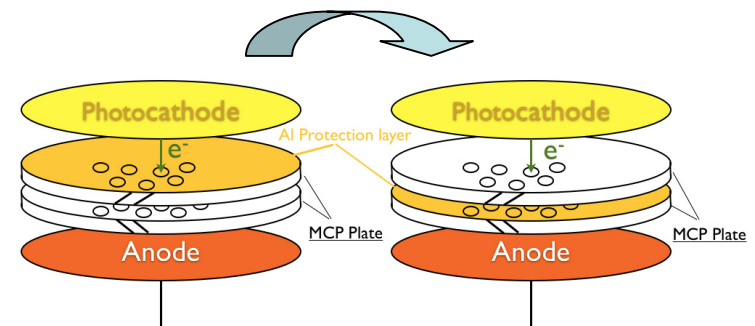
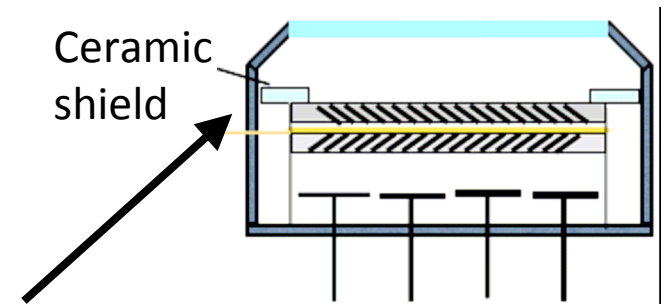
- 角型MCP-PMTの寿命測定

- アルミ保護膜があっても短寿命であることが判明
- 量子効率の面一様性から内部構造の違いについて考察
 - MCPと側管の間から中性ガスが光電面へ到達し得る



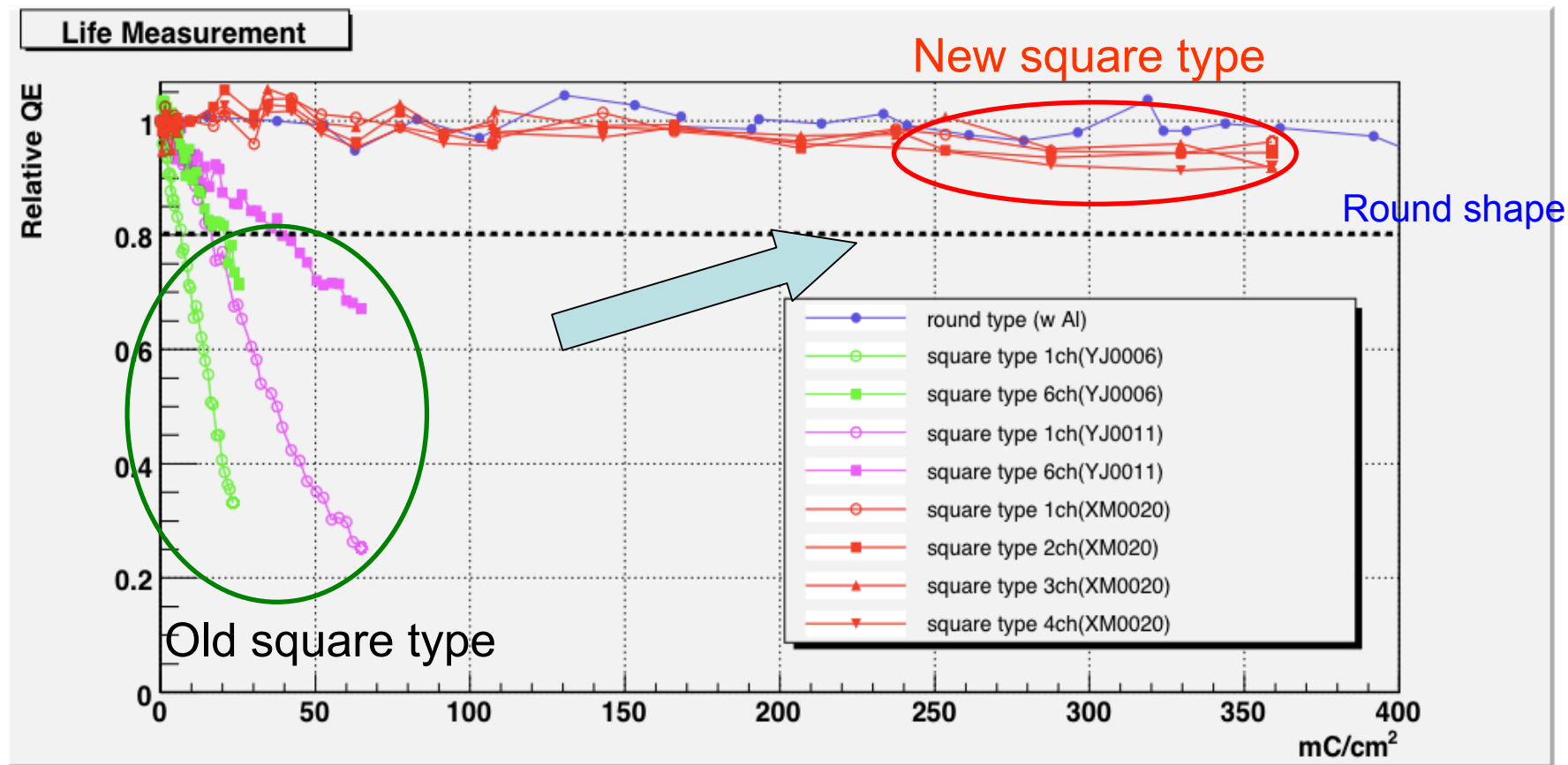
- 改良版MCP-PMTの試作

- セラミックシールドを導入し、中性ガスを遮断
- 中性ガスが発生しにくいMCPの処理
- アルミ保護膜をMCP2枚目へ導入
 - 収集効率の向上(35%→60%)



MCP-PMT寿命結果

- 大幅に向上させることに成功し、十分な寿命を達成



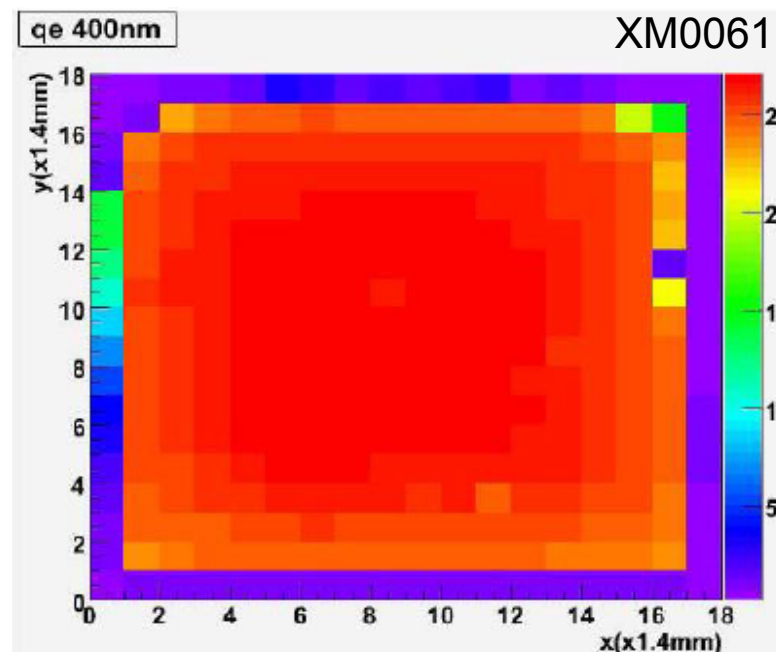
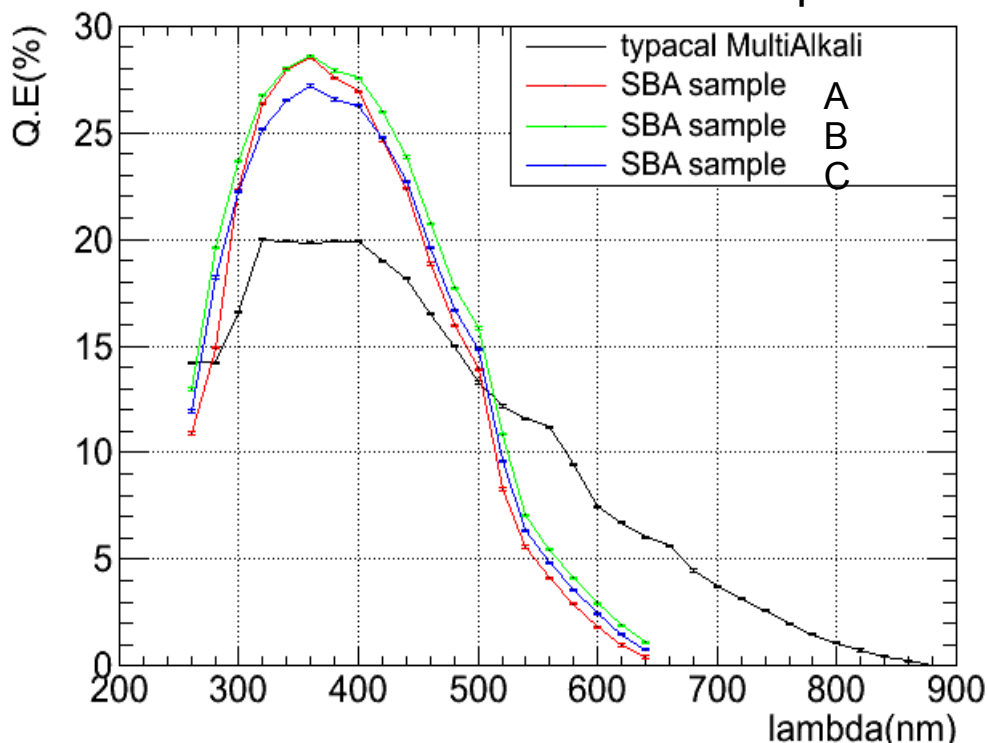
0.5 year 1year 1.5year 2year 2.5year 3year

@Belle-II

光電面の改良(Super Bi-Alkali)

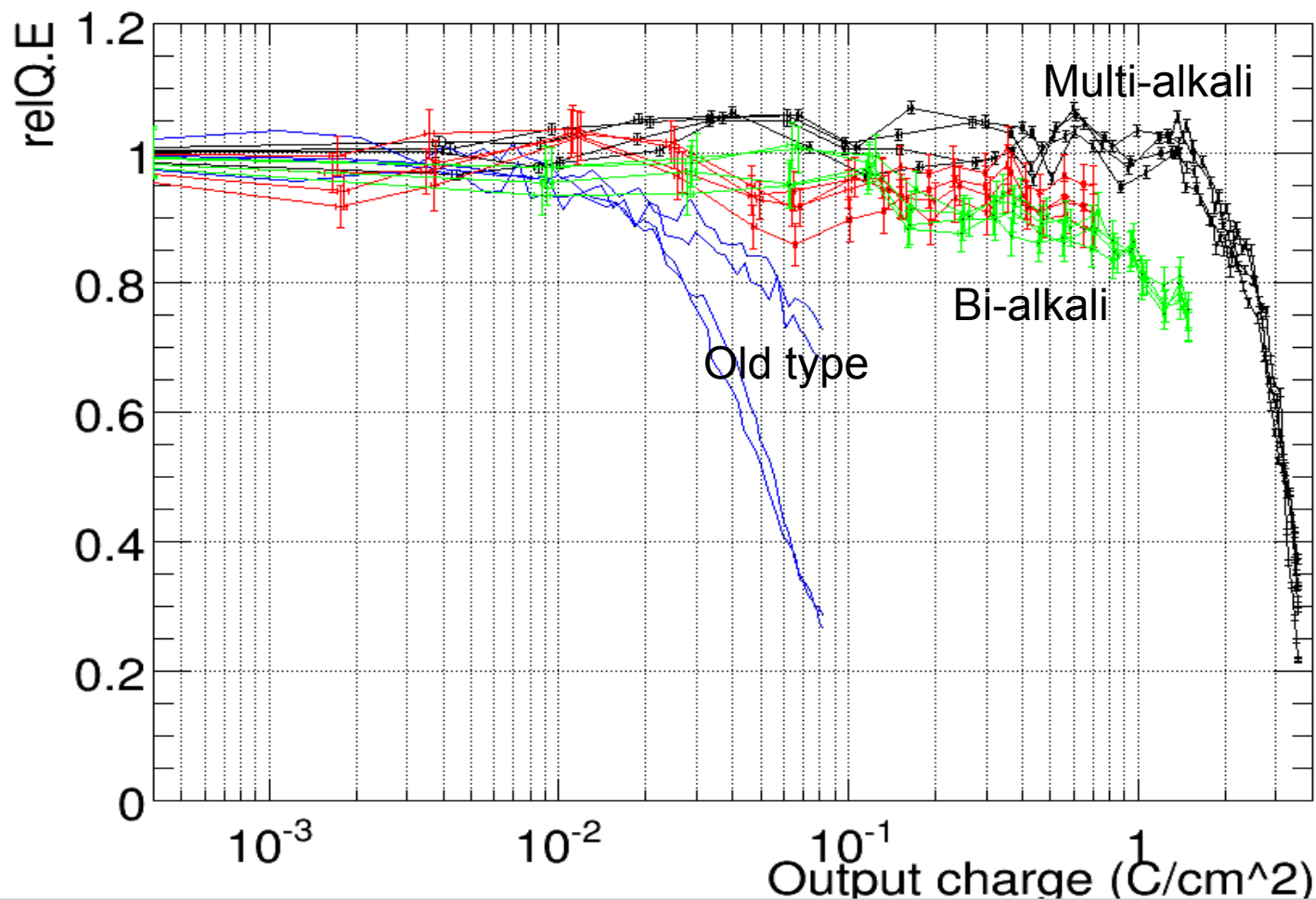
- GaAsP光電面は歩留まりが向上せず、実用化が困難
- Super bialkali 光電面の適用
 - 28% for super bialkali and 24% for Multi-alkali
 - 検出光子数20%の向上が見込める

QE distributions for recent samples

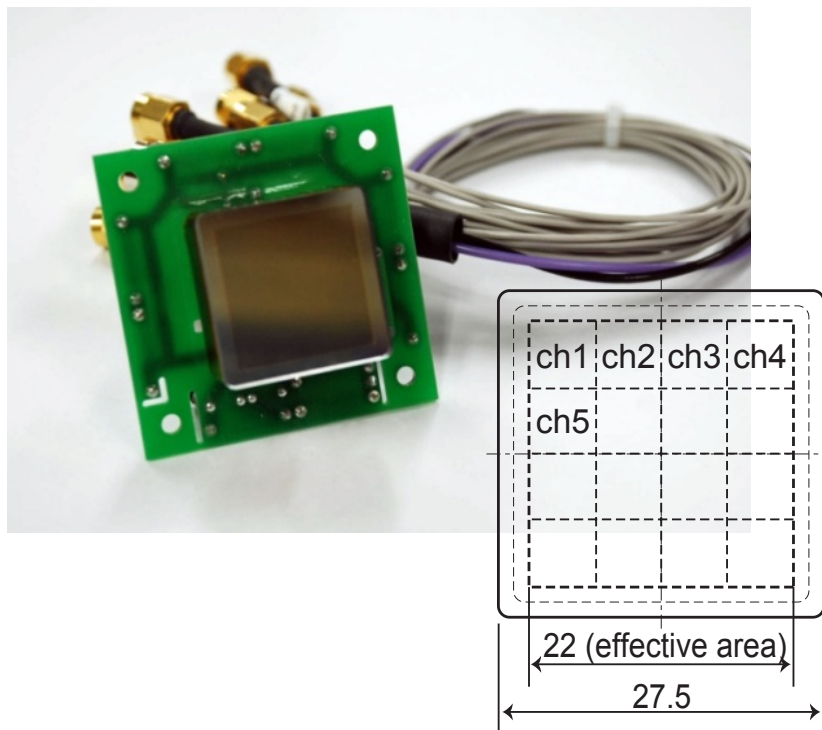


MCP-PMT寿命結果

- Super bialkali光電面MCP-PMTにおいても
1~2 C/cm²の寿命を達成



角型MCP-PMT (最終版)



Size	27.5 x 27.5 x 14.8 mm
Effective area	22 x 22 mm(64%)
Photo cathode	Super-Bialkali
Q.E.	~28%($\lambda=400\text{nm}$)
MCP Channel diameter	10 μm
Number of MCP stage	2
Collection efficiency	~60%
Anode	4 x 4
Anode size (1ch)	5.3 x 5.3 mm
Anode gaps	0.3 mm

- High time resolution
- Large effective area
- Position information
- Sufficient lifetime

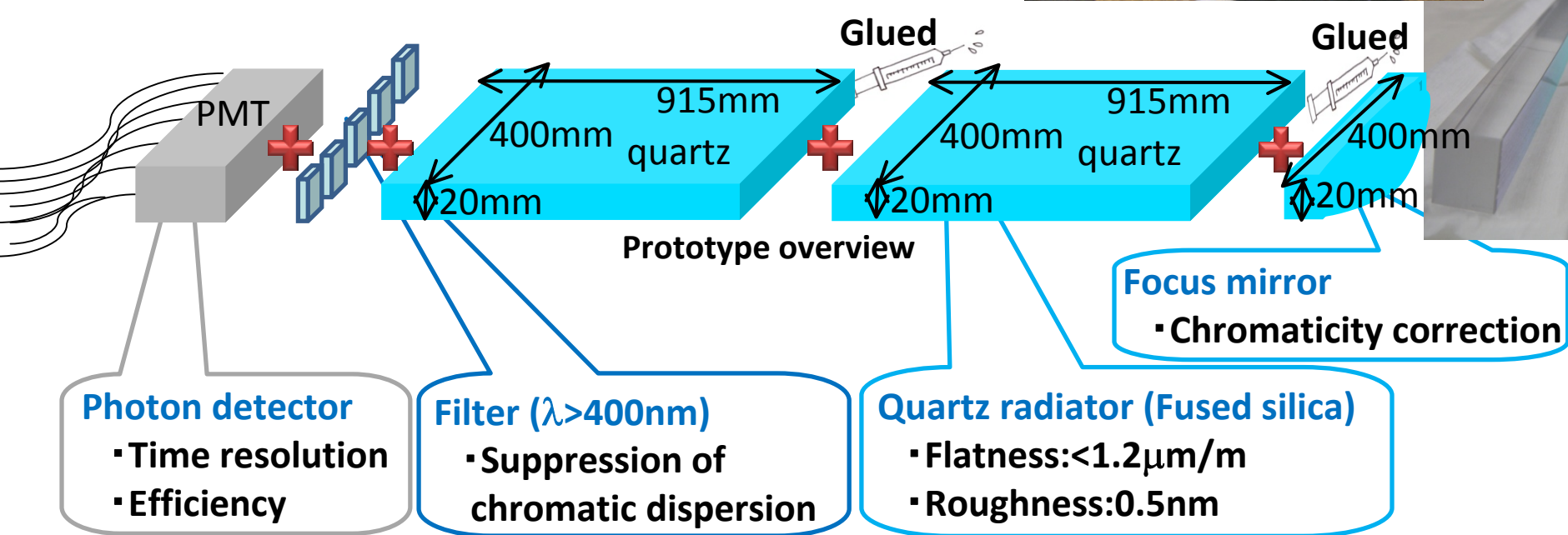
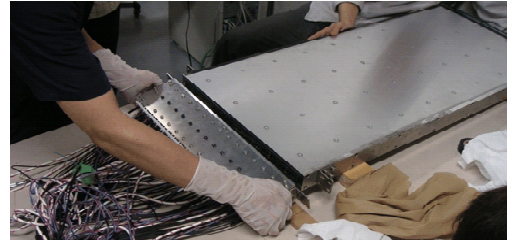
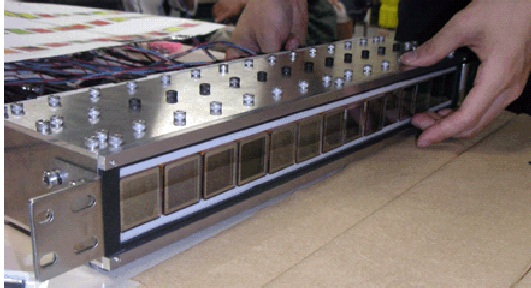
$\sigma < 40\text{ps}$

64% by square shape

4x4ch matrix anode (5mm pitch)

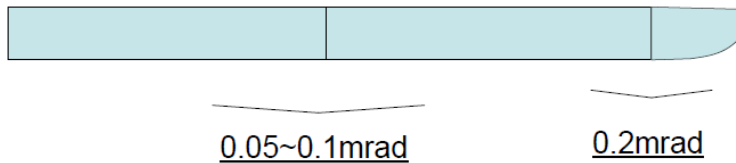
$> 1\text{C}/\text{cm}^2$

プロトタイプ製作

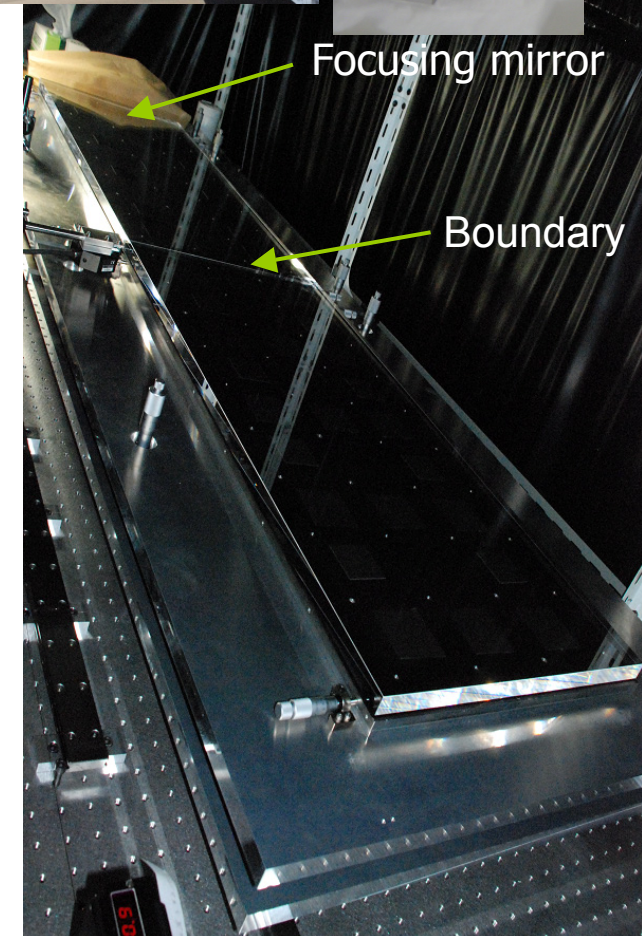
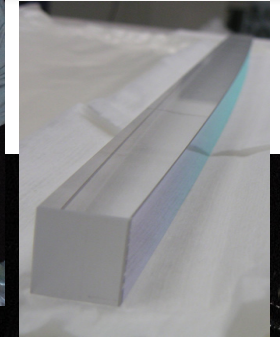
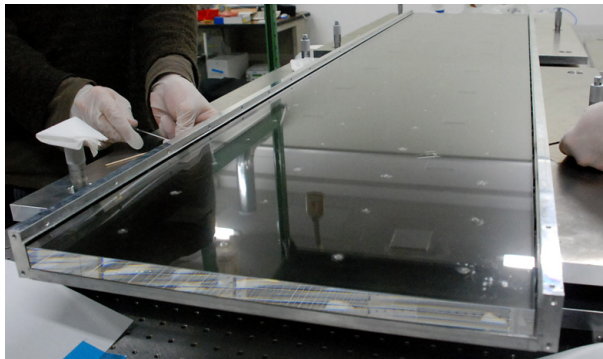


石英輻射体

- 高精度研磨石英板2枚
 - 91.5 x 40 x 2 cm³, 岡本光学
 - 平面性: <math><1.2\mu\text{m}/\text{m}</math>
 - 面粗度: <math><0.5\text{nm}</math>
- フォーカスマirror (R=5m)
- 接合
 - 平面度; $\sim 0.2\text{mrad}$

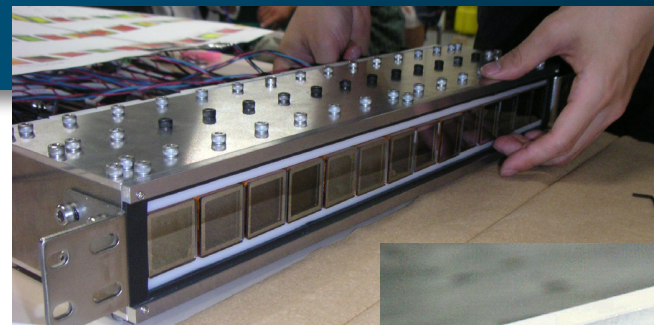


- アルミハニカム支持体を製作

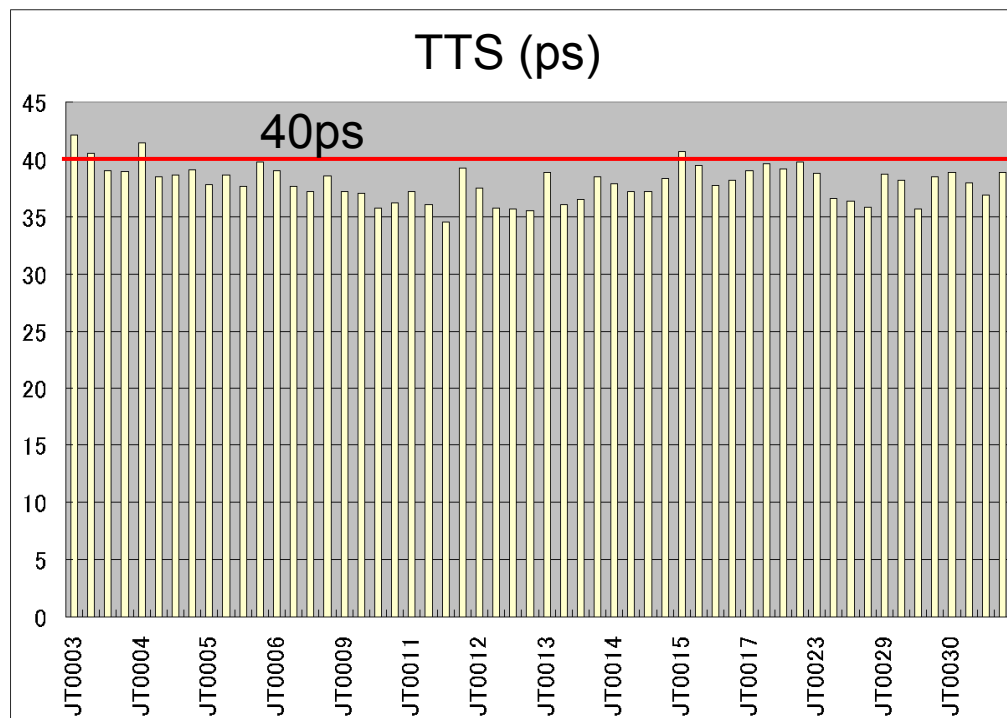
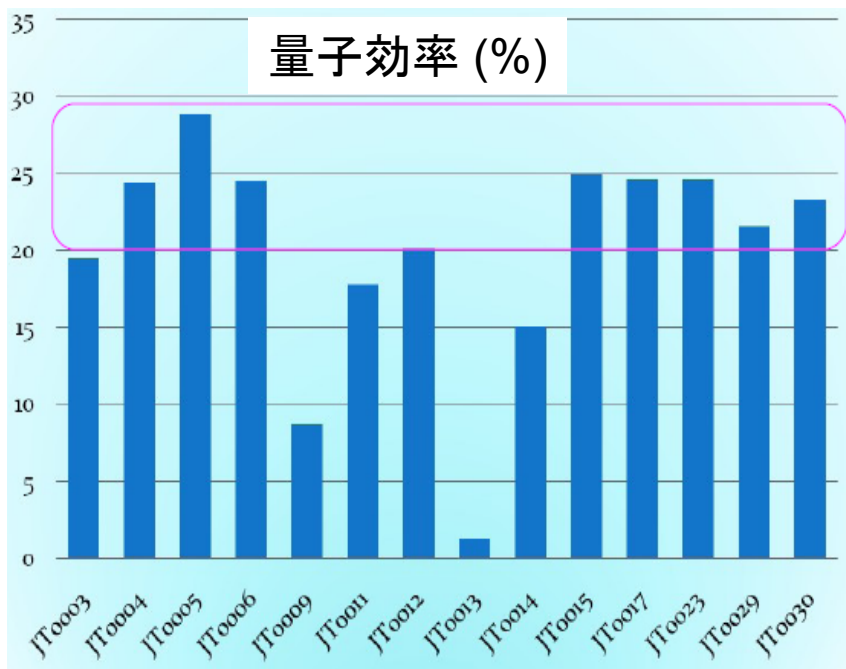
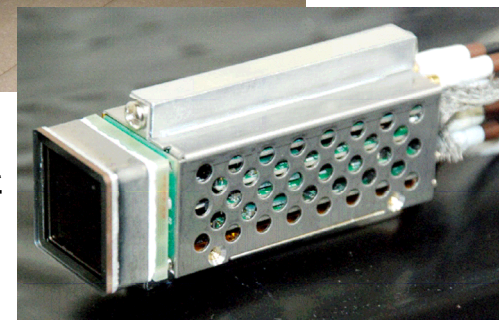


光検出器

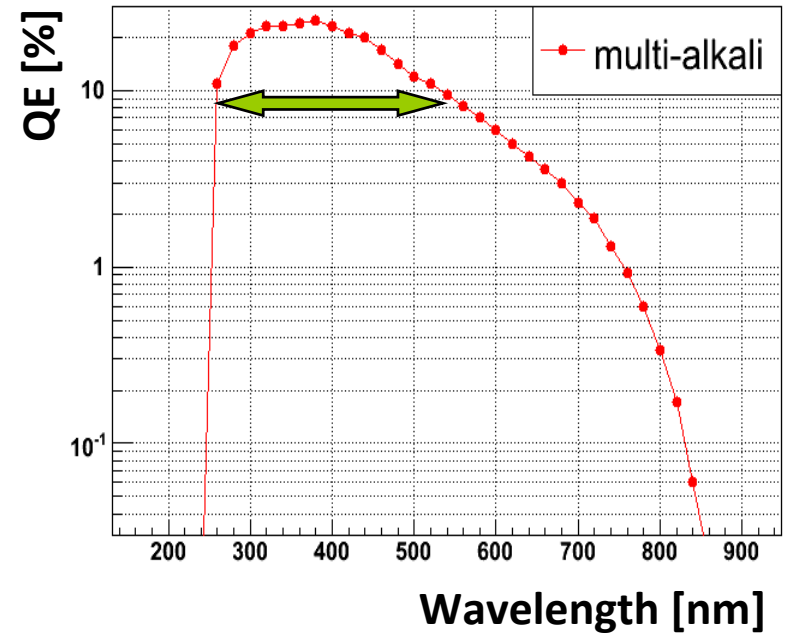
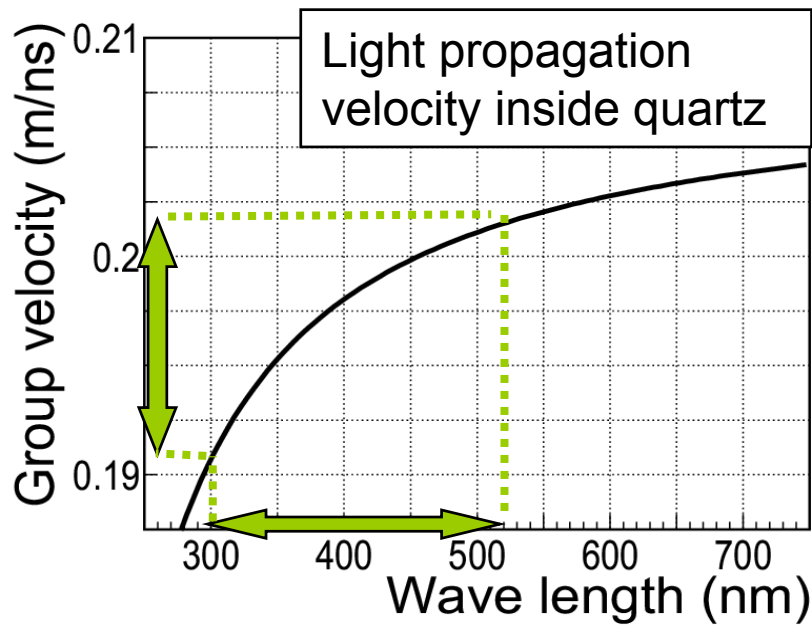
- MCP-PMT 14個試作・検査
 - TOPプロトタイプ用
 - 製作での安定性を評価
 - TTS, Gainは安定的
 - 量子効率が開発の必要性有り



MCP-PMT出力に対応した読み出し回路の開発



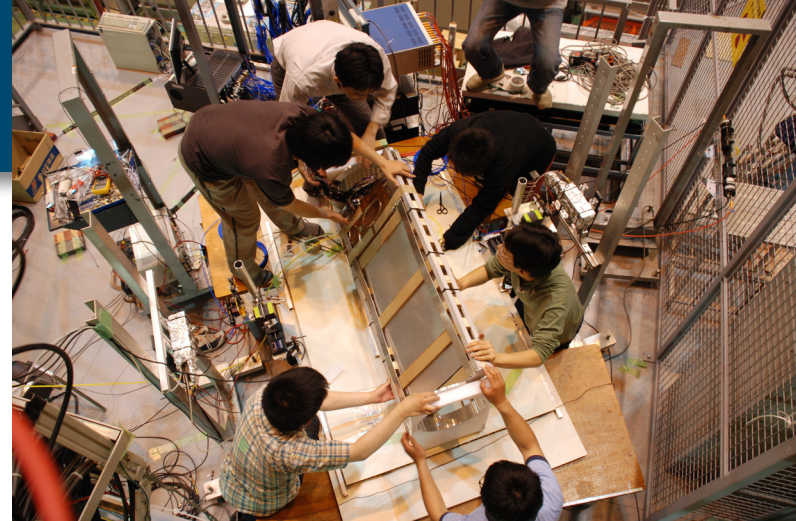
色分散効果



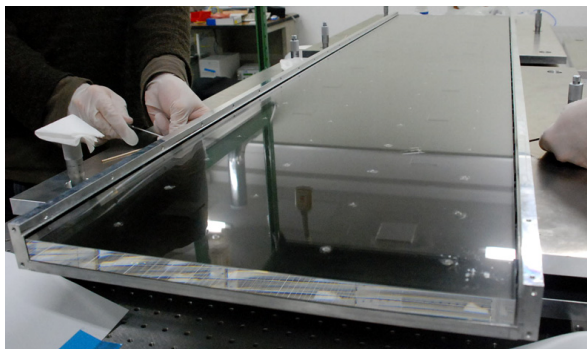
- 輻射体内での伝播速度依存性 + チェレンコフ光の検出波長範囲
→ リンガイメージの時間ふらつきを生み出す
→ 伝播距離に依存した時間分解能の変化

ビームテスト(2008)

- KEK Fuji test beam line, 電子ビーム



Quartz + support jig



TOP counter

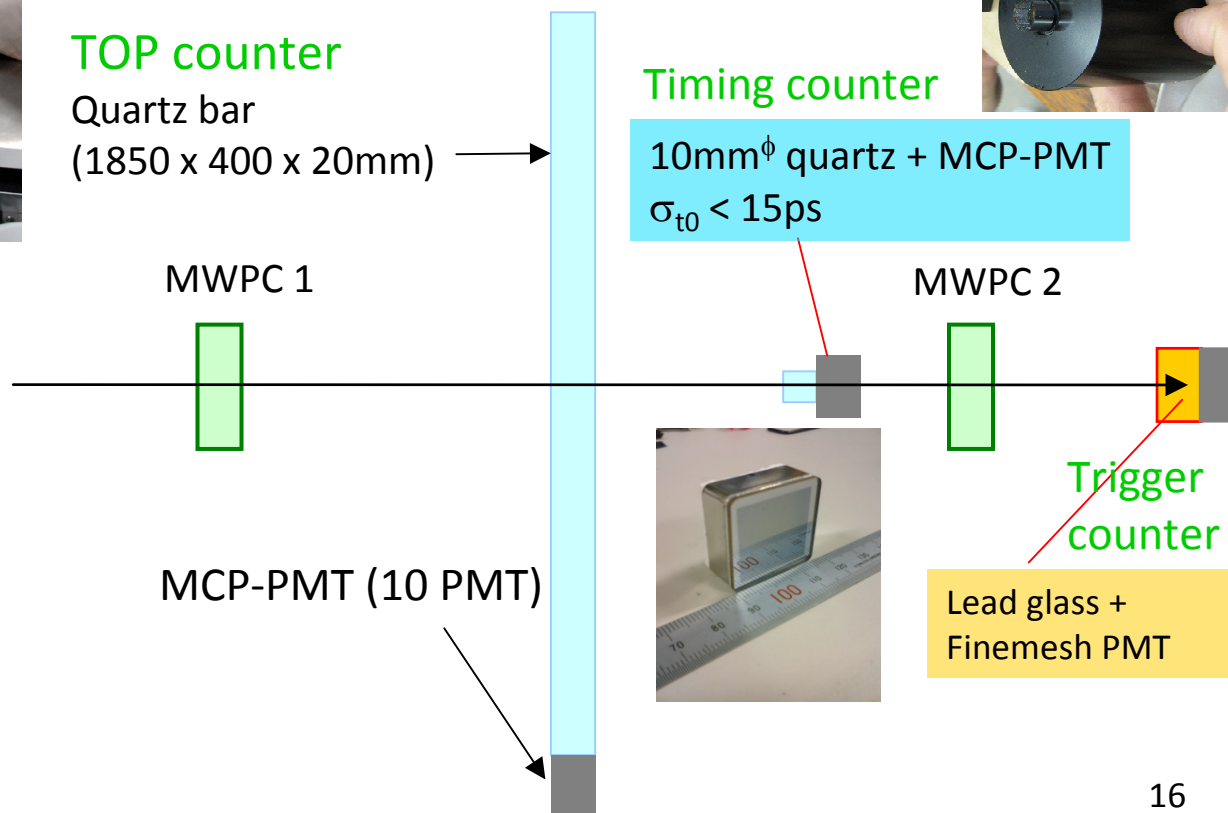
Quartz bar
(1850 x 400 x 20mm)

Timing counter

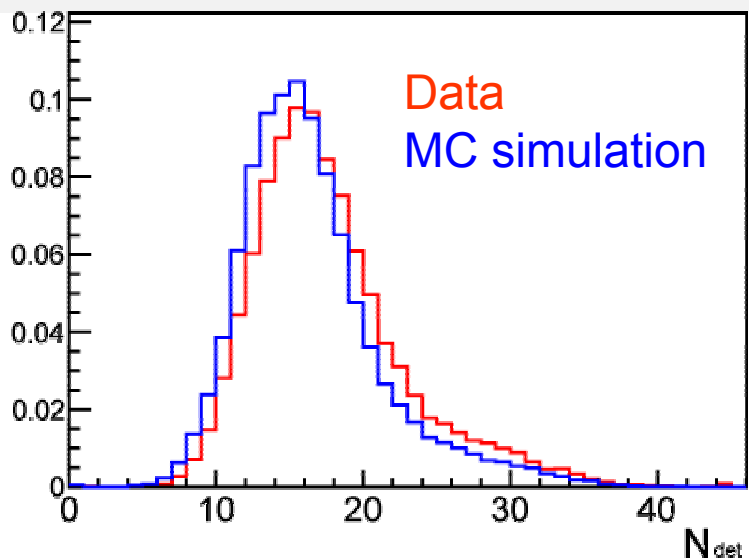
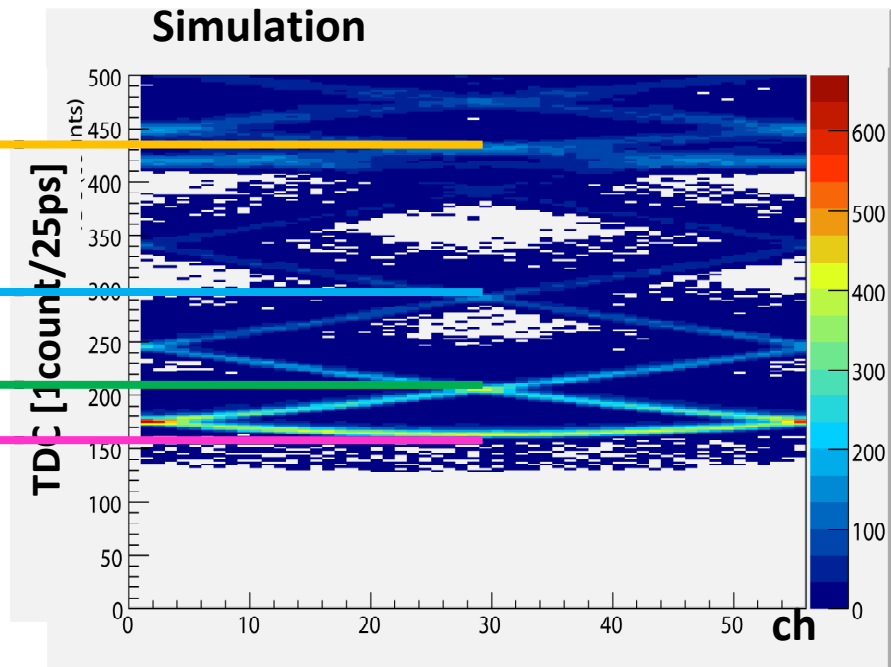
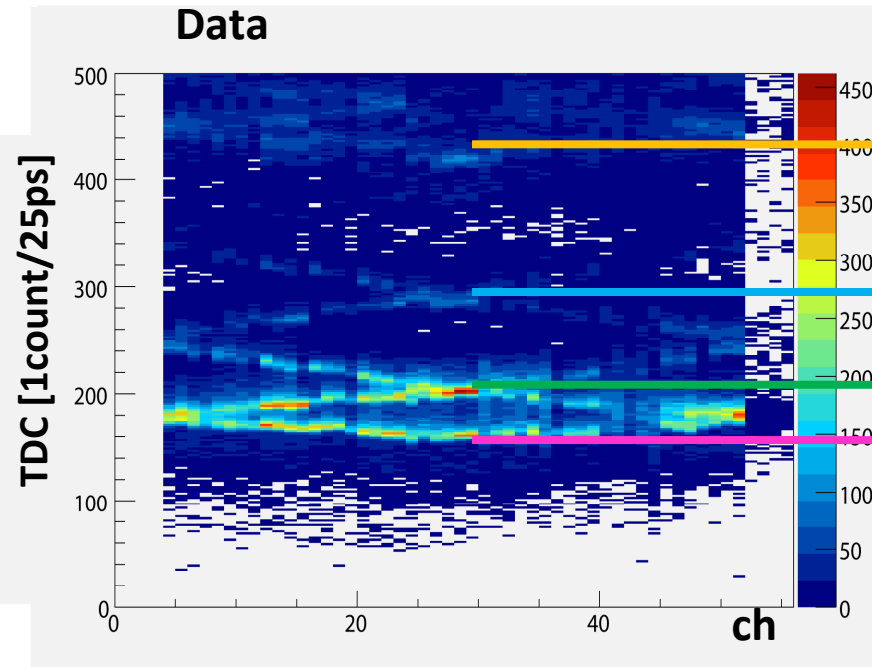
10mm ϕ quartz + MCP-PMT
 $\sigma_{t0} < 15\text{ps}$



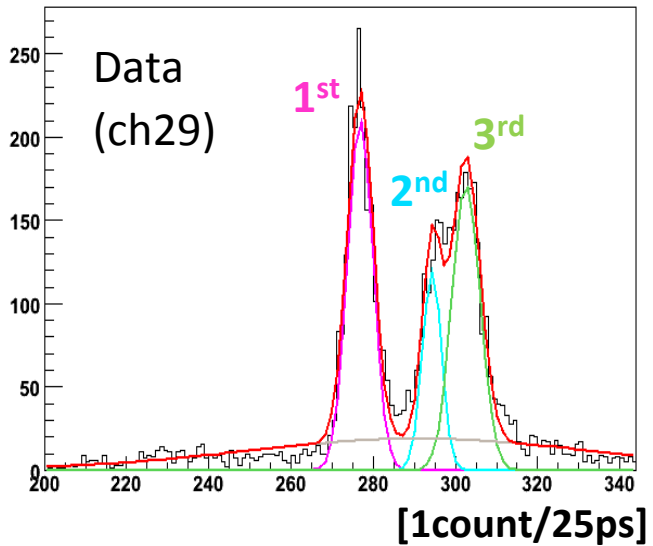
- 評価項目
 - リングイメージ
 - 検出光子数
 - 時間分解能



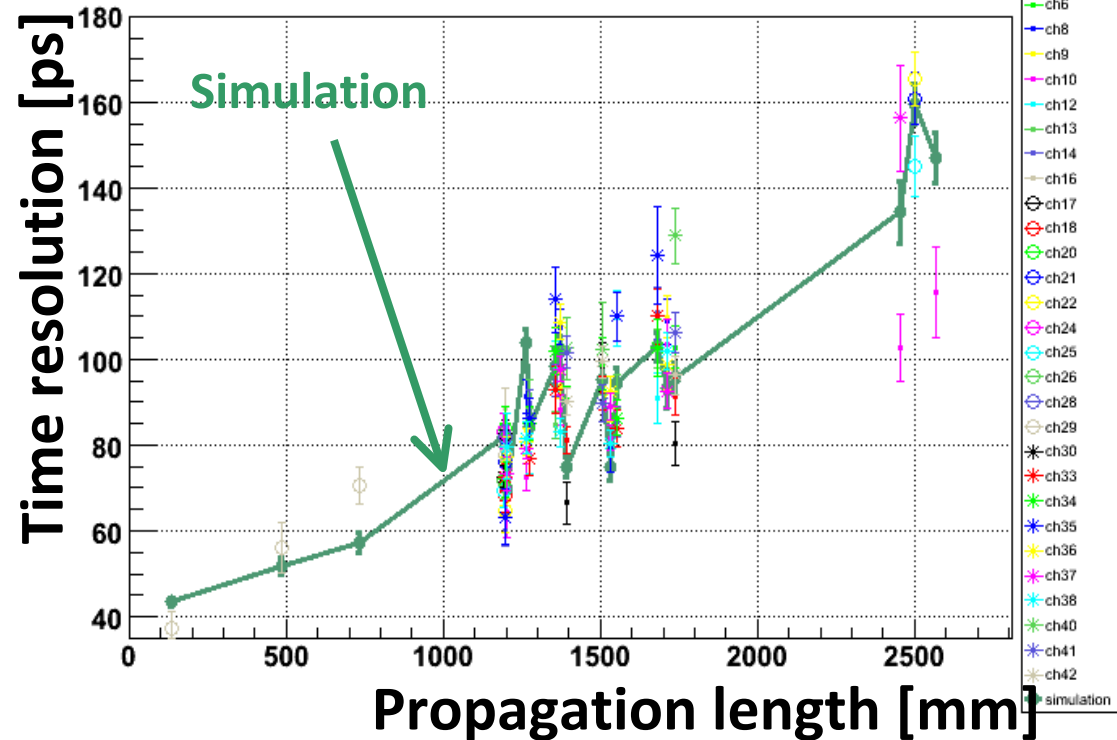
リングイメージ・検出光子数



- 期待されるリングイメージ・検出光子数を取得



ch.29	Resolution(1 st peak)
Data	76.0 ± 2.0 [ps]
Simulation	77.7 ± 2.3 [ps]



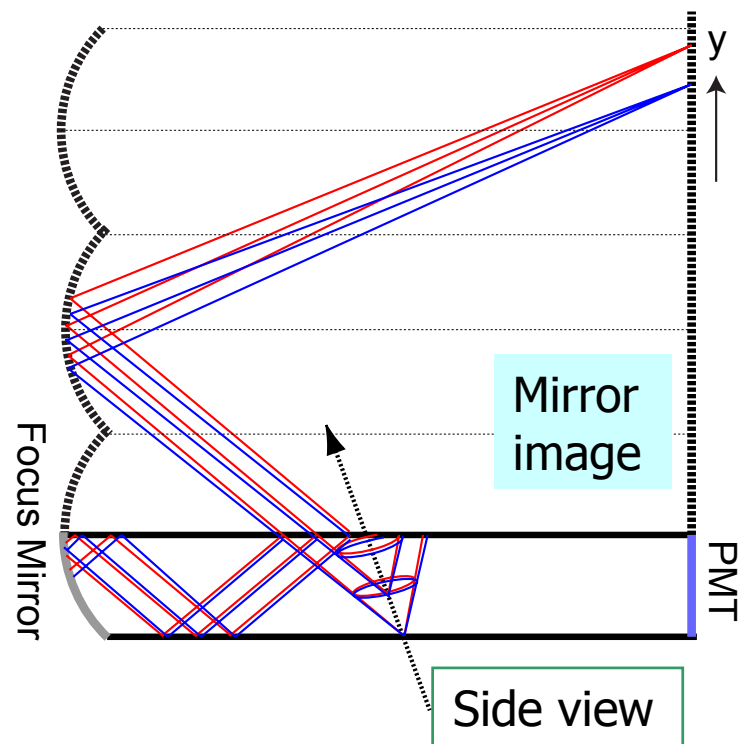
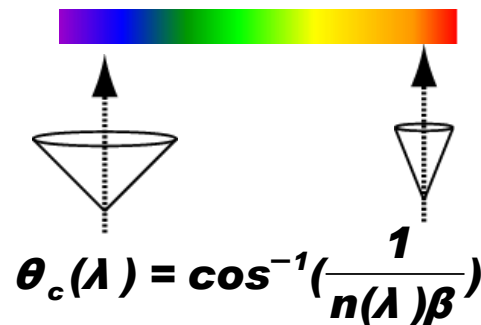
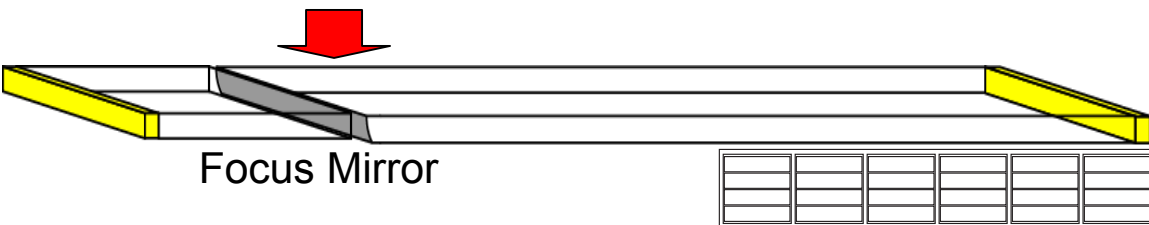
- 期待される時間分解能
- 伝播距離依存性を再現
 - 色分散効果による時間分解能の悪化

- フォーカスマラーの導入により色分散を抑制

- 色収差補正のために、チェレンコフ角の波長依存性を利用

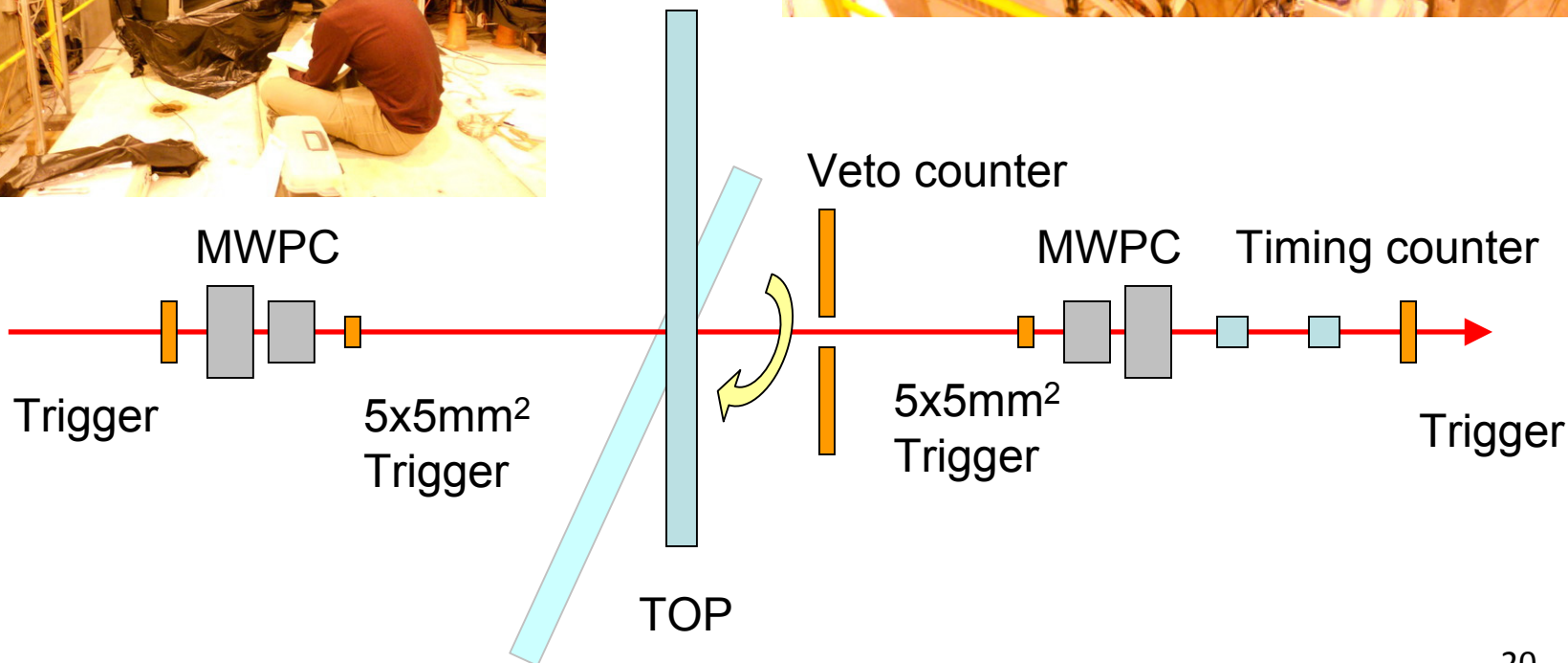
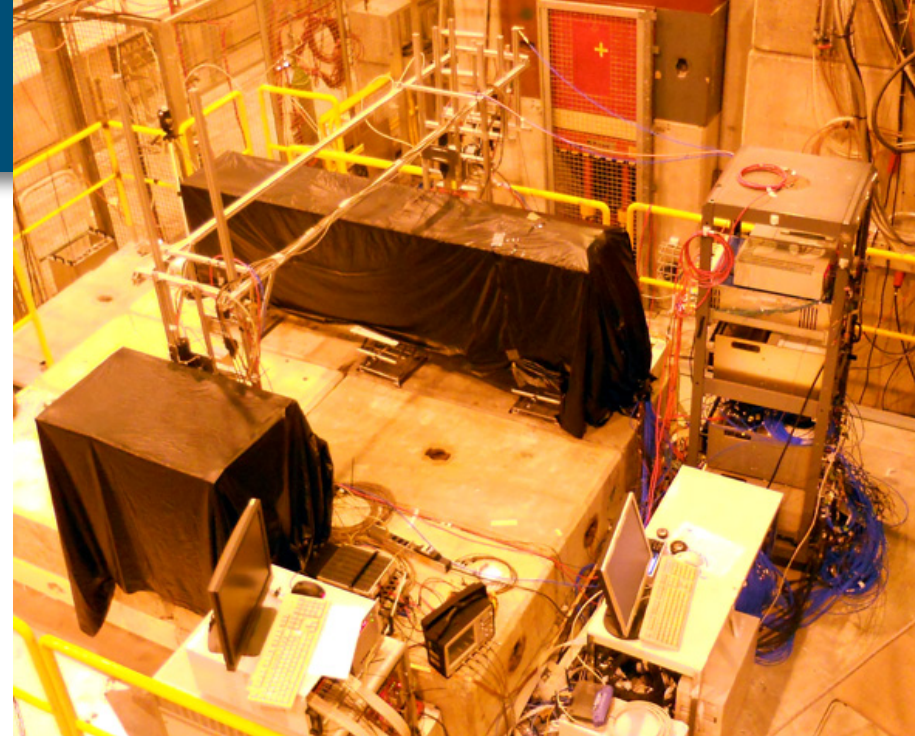
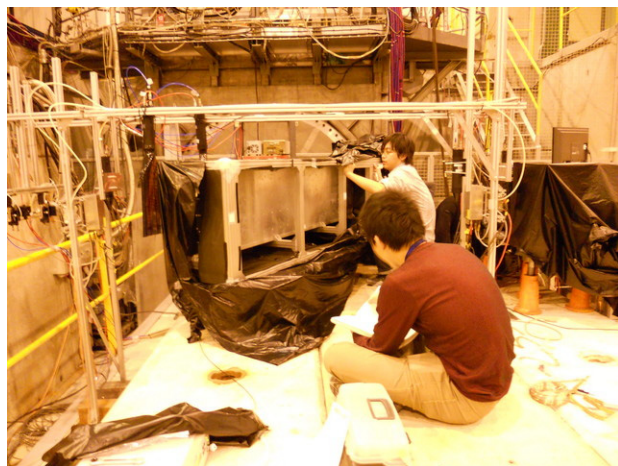
→ $\lambda \leftarrow \theta_c \leftarrow y$ 位置

- 2次元位置と時間の3次元情報を用いたリングイメージの再構成
- 長距離焦点ミラーの導入により、コンパクトな測定器を実現 + 5mmの位置分解能で波長分解が可能

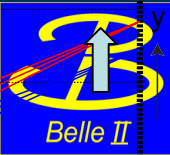


ビームテスト(2010)

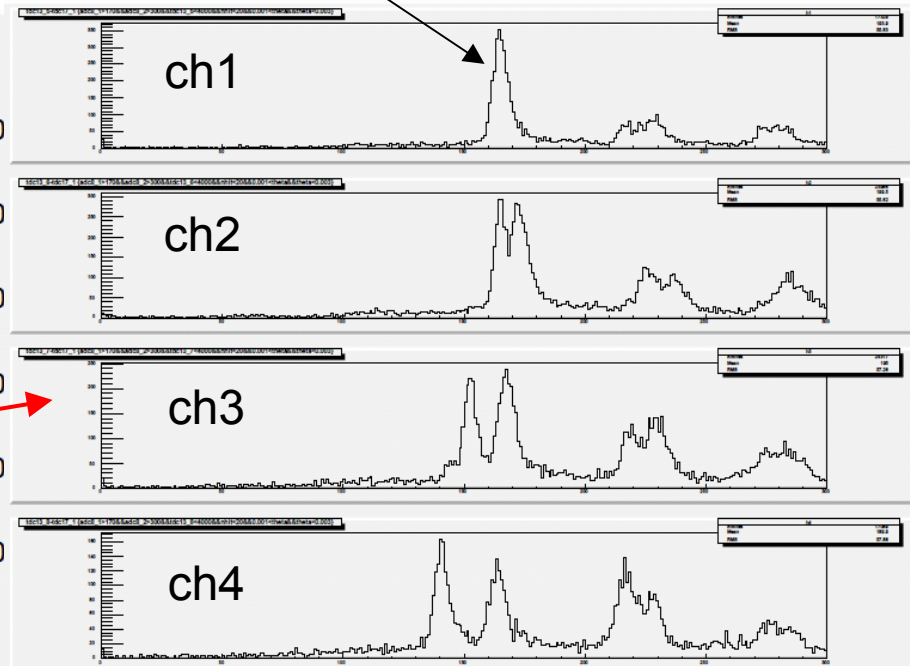
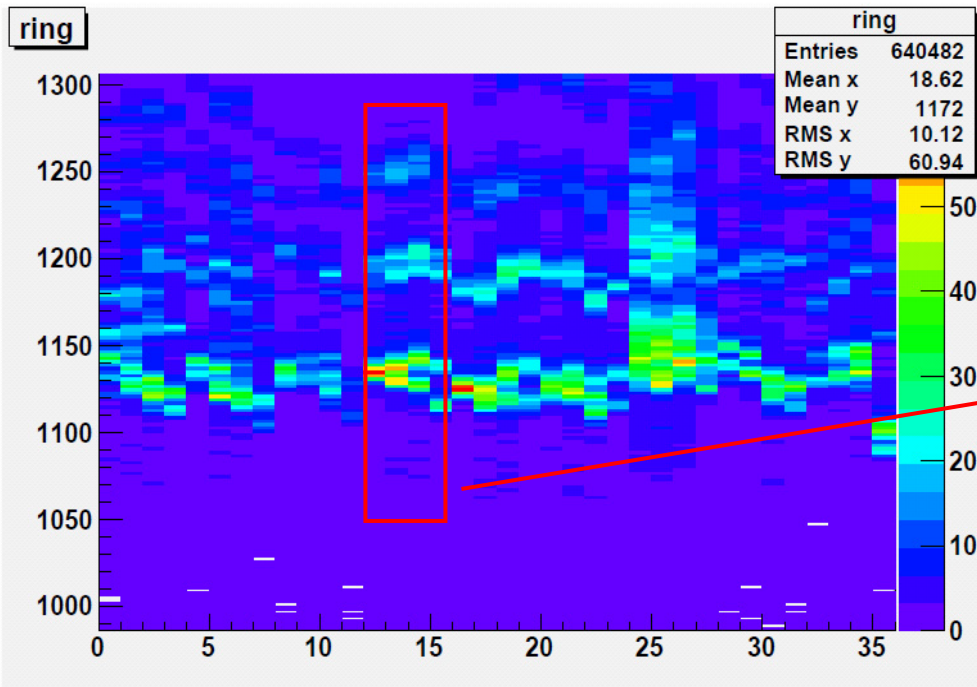
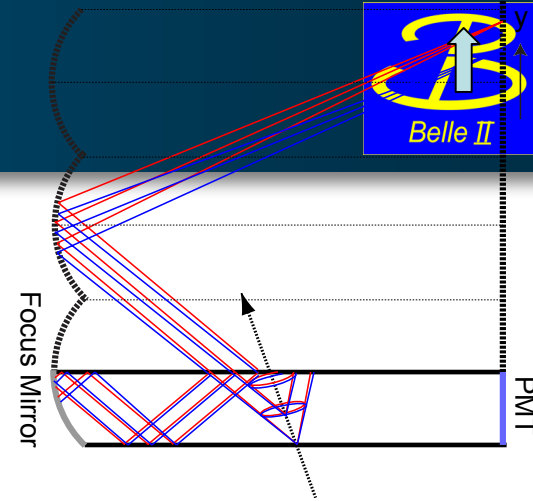
- CERN SPS T4-H6B
 - pion; +120GeV
 - 11月8-15日



測定結果

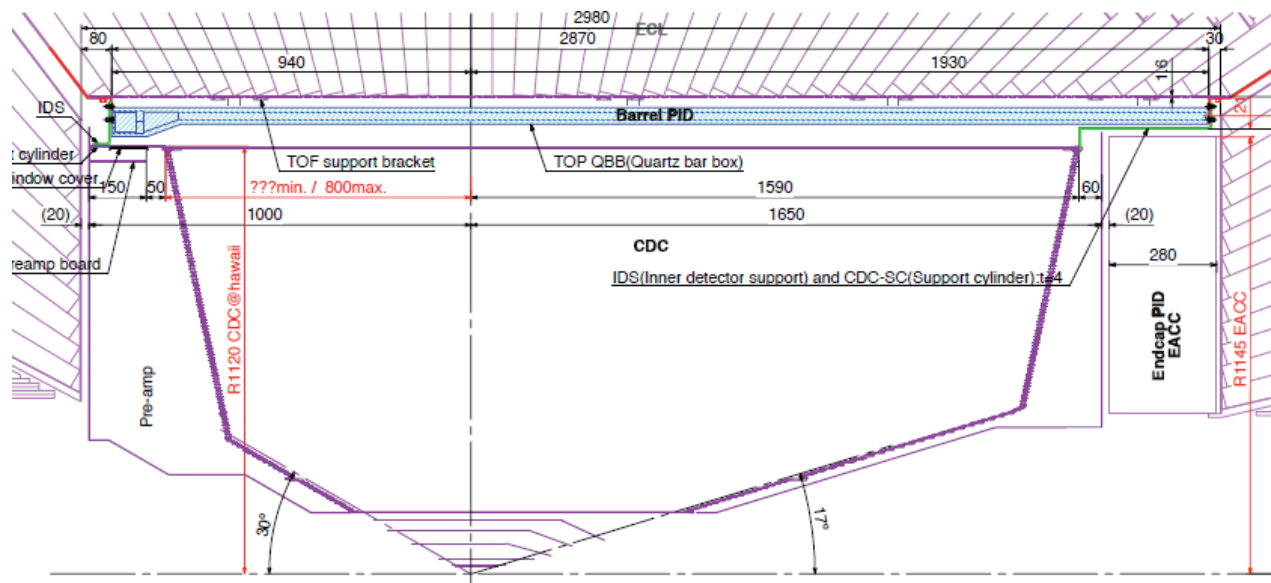
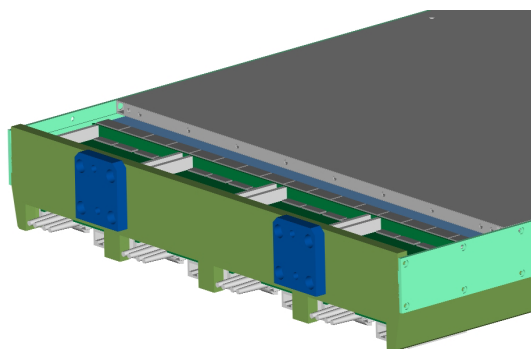
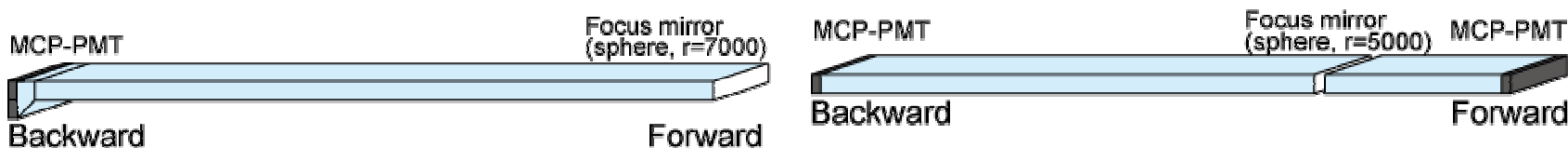


- 角度付き入射($\cos\theta=0.3$ に対応)
- 期待される振る舞いを持つリングイメージを取得
- **時間分解能の向上を確認** : $\sim 95\text{ps}$
 - シミュレーション: $\sim 103\text{ps}$
 - 色分解なしでは、2900mmの伝播に対応し、 $\sim 170\text{ps}$ の分解能
 - 詳細な解析は現在進行中



実用化に向けた開発研究

- Belle-II搭載に向けた形状最適化・構造体開発
 - ハワイ大学、リュブリアナ研究所等との共同開発研究
 - 物理過程($B \rightarrow \pi\pi, \rho\gamma$ など)に対する性能比較による測定器形状の選択
 - 設置可能な範囲で測定器形状を最適化
 - 既存のBelle構造体に設置できる支持体のデザイン



実用化に向けた開発研究



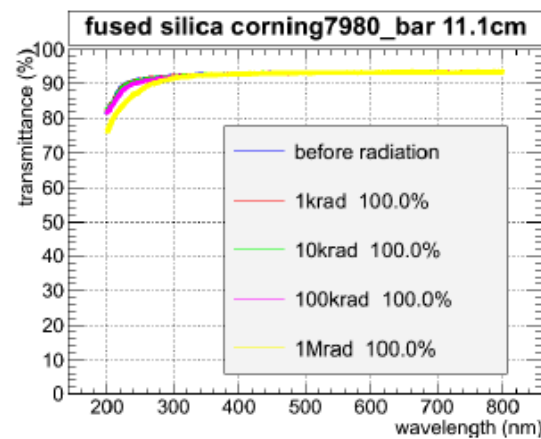
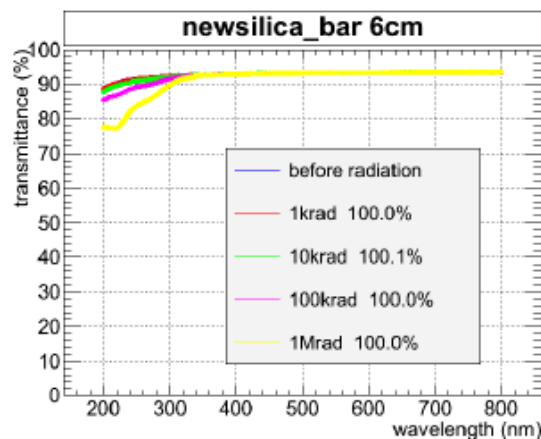
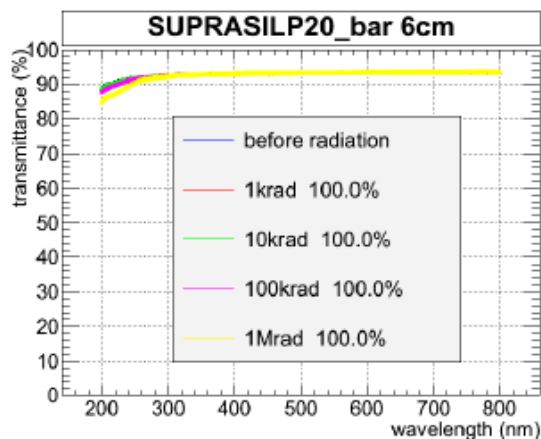
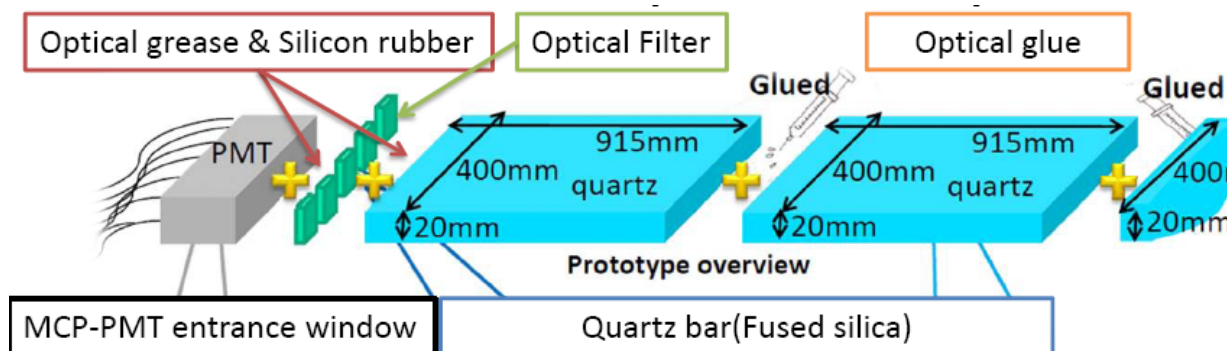
放射線耐性試験

- γ 線・中性子線
- 光学素子の透過率、MCP-PMTの量子効率
- γ 線1Mrad, 中性子 10^{12} n/cm²まで問題なし

名古屋大学Co60照射室



東京大学弥生原子炉



- Time of Flight measurement with MCP-PMT
 - K. Inami, Proceedings for In the Proceedings of International Symposium on Detector Development for Particle, Astroparticle and Synchrotron Radiation Experiments (SNIC 2006)
- A 5-ps TOF-counter with an MCP-PMT
 - K. Inami, N. Kishimoto, Y. Enari, M. Nagamine, T. Ohshima, Nucl.Instrum.Meth.A560:303-308,(2006)
- Lifetime of MCP-PMT
 - N. Kishimoto, M. Nagamine, K. Inami, Y. Enari, T. Ohshima, Nucl.Instrum.Meth.A564:204-211,(2006).
- Timing properties of MCP-PMT
 - K. Inami, Proceedings for International Workshop On New Photon Detectors (PD07), PoS PD07:020,2006
- Cross-talk suppressed multi-anode MCP-PMT
 - K. Inami et al., Nucl Instrum Meth A 592 247 (2008)
- Development of TOP counter for Super B factory
 - K.Inami, Proceedings for 6th International Workshop On Ring Imaging Cherenkov Counters (RICH 2007), Nucl.Instrum.Meth.A595:96-99,(2008).
- Likelihood analysis of patterns in a time-of-propagation (TOP) counter
 - M. Staric, K. Inami, et al, Proceedings for 6th International Workshop On Ring Imaging Cherenkov Counters (RICH 2007), Nucl.Instrum.Meth.A595:252-255,(2008).
- Photomultiplier tubes with three MCPs
 - A.Yu. Barnyakov, K.Inami, T.Mori, T.Ohshima, et al., Proceedings for 10th International Conference on Instrumentation for Colliding Beam Physics (INSTR08), Nucl.Instrum.Meth.A598:160-162,2009.
- Development of a TOP counter for the super B factory
 - K. Inami, Proceedings for Workshop on fast Cherenkov detectors: Photon detection, DIRC design and DAQ, JINST 5:P03006,2010.
- Lifetime-Extended MCP-PMT
 - T. Jinno, T. Mori, T. Ohshima, Y. Arita, K. Inami,et al, Nucl.Instrum.Meth.A629:111-117,2011.
- Performance Test of TOP Counter Prototype
 - T.Mori, Proceedings for IEEE Nuclear Science Symposium 2010
- Lifetime of HPK Square-shape MCP-PMT
 - T.Mori, Proceedings for WORKSHOP ON TIMING DETECTORS

- Time of Flight measurement with MCP-PMT, K.Inami
 - K.Inami, In the Proceedings of International Symposium on Detector Development for Particle, Astroparticle and Synchrotron Radiation Experiments (SNIC 2006), 2006/4/3 - 6, SLAC, USA
- Timing properties of MCP-PMT, K. Inami
 - Workshop on timing detectors, 2007/3/8-9, Paris, France
 - International Workshop On New Photon Detectors (PD07), 2007/6/27-29, Kobe, Japan
- Development of TOP counter for Super B factory, K.Inami,
 - 6th International Workshop On Ring Imaging Cherenkov Counters (RICH 2007), 2007/10/15-20, Trieste, Italy
- Tests of MCP-PMT for the TOP counter, K.Inami
 - Workshop on timing detectors: Medical and Particle Physics applications, 2008/10/15-16, Lyon, France
- R&D of Particle identification devices with high precision timing, K.Inami
 - The 1st international conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics, (TIPP09) 2009/3/12-17, Tsukuba, Japan,
- Development of time of propagation counters, K.Inami
 - Workshop on Fast Cherenkov Detector, 2009/5/11-13, Gie β en, Germany
- TOP counter prototype R&D, K.Inami
 - 7th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors (RICH 2010), 2010/5/3-7, Cassis, Provence, France,
- Performance Test of TOP Counter Prototype, T.Mori
 - IEEE Nuclear Science Symposium 2010, 201/10/30-11/6, Knoxville, TN, USA
- Lifetime of HPK Square-shape MCP-PMT, T.Mori
 - WORKSHOP ON TIMING DETECTORS, 2010/11/29 - 12/1, Krakow, Poland

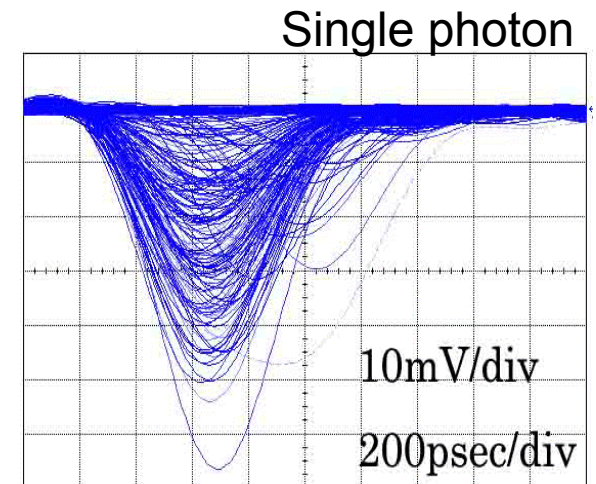
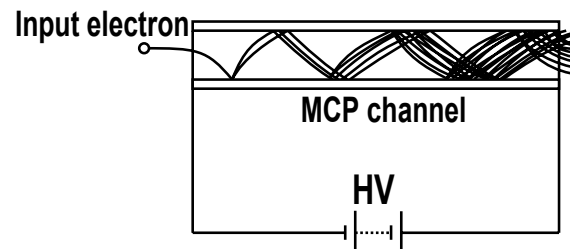
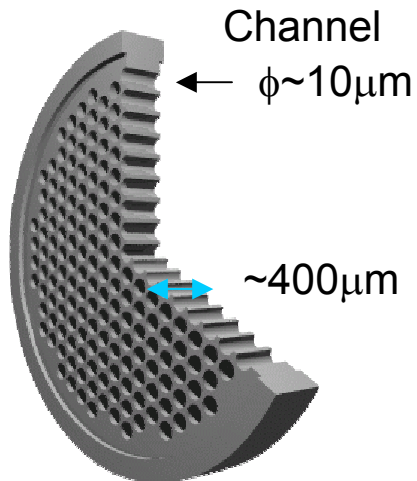
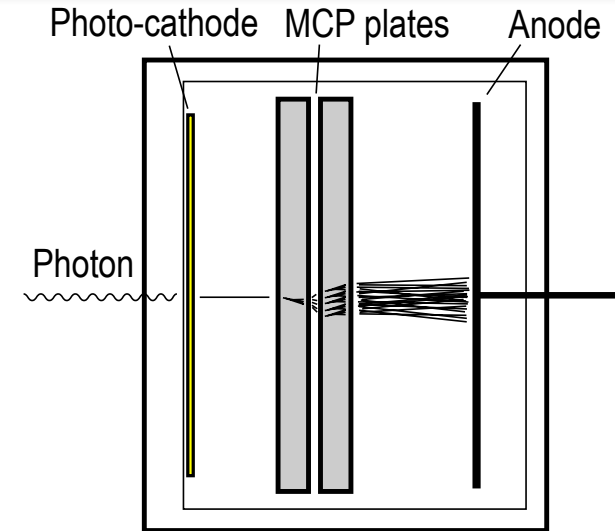
- 第2回次世代光センサーに関するワークショップ 2006/12/7-8, 浜松
 - 居波賢二“TOPカウンター用MCP-PMTの開発”
- 日本物理学会 2007年秋季大会 2007/9/21-24 北海道大学
 - 森隆志 “TOPカウンター用GaAsP光電面MCP-PMTの開発研究”
- 日本物理学会 2007年秋季大会 2007/9/21-24 山形大学
 - 森隆志“RICH型粒子識別装置TOPカウンターの実機プロトタイプ構築”
 - 栗本謙“RICH型粒子識別装置TOPカウンターのパフォーマンス評価”
- 日本物理学会 2009年秋季大会 2008/9/9/10-13 甲南大学
 - 神野高幸 “光検出器MCP-PMTの長寿命化対策”
- 関西中部B中間子の物理研究会 (奈良女子大学)
 - 森隆志 “大学activity: 粒子識別”
- 日本物理学会 2010年次会 2010/3/20-23 岡山大学
 - 居波賢二“Belle II 実験”(招待講演)
 - 有田 義宣 “16チャンネル角型MCP-PMTの開発研究・性能評価”
- 日本物理学会 2010年秋季大会 2010/9/11-14 九州工業大学
 - 鈴木一仁 “TOPカウンターの開発研究—Belle IIでの実機製作に向けた開発・設計状況—”
 - 有田義宣 “BelleII実験TOPカウンター用MCP-PMTの量子効率の改良と寿命測定”
- 第3回次世代光センサーに関するワークショップ 2011/12/17-18, 名古屋
 - 鈴木一仁“Lifetime and radiation hardness of MCP-PMT for Belle II TOP counter”
- 日本物理学会 2011年次会 2011/3/25-28 新潟大学
 - 有田義宣 “粒子識別装置 TOPカウンターの色分解による識別能力の向上”
 - 武市秀樹 “Belle II TOPカウンター実機用16ch MCP-PMTのパフォーマンス”
 - 古賀裕介 “Belle II実験 粒子識別装置TOPカウンター光学素子の放射線耐性試験”

- TOPカウンターの原理的な動作検証と実用化に向けた開発
- MCP-PMT
 - 安定的に良いTTS(<40ps)、十分なゲインが得られることを確認
 - 内部構造の改良により寿命を向上させた
 - Super Bialkali光電面の開発
 - 検出光子数の向上、十分な寿命の実現
- プロトタイプの開発・ビームによる性能評価
 - リングイメージ、検出光子数が期待どおり得られた
 - 時間分解能の伝播距離依存性
 - 色分散効果の大きさを検証
 - フォーカシングミラーを用いた光学系で時間分解能が向上することを確認
- 実用化に向けた研究も進行中
 - TOP形状の最適化、支持構造体の開発
 - 光学部品、MCP-PMTの放射線耐性の評価など

Back up

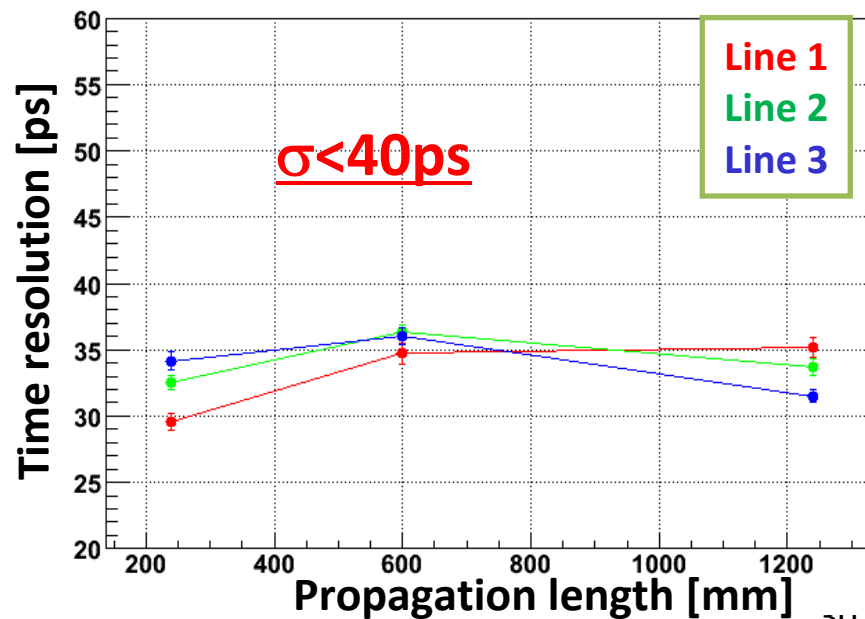
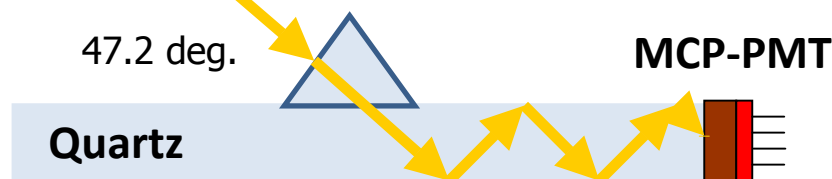
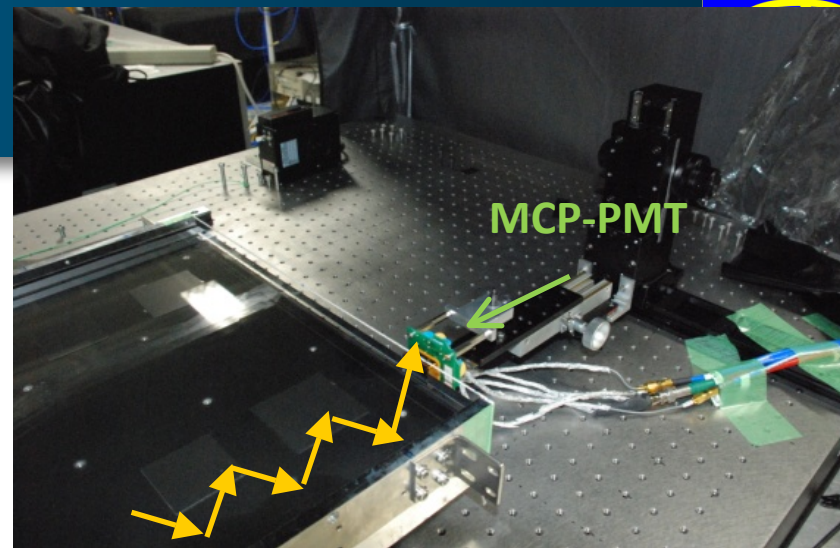
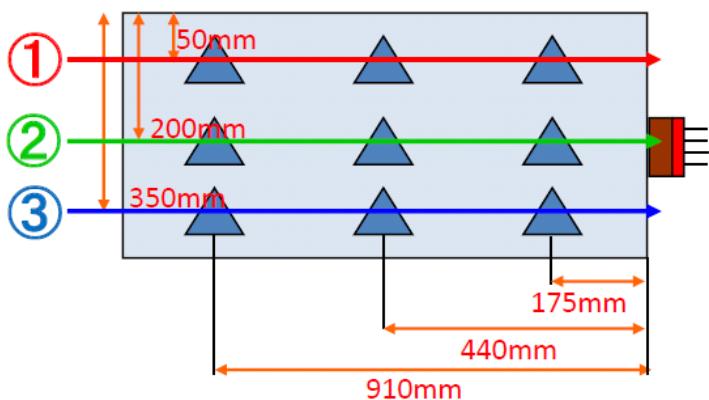


- Micro-Channel-Plate
 - Tiny electron multipliers
 - Diameter $\sim 10\mu\text{m}$, length $\sim 400\mu\text{m}$
 - High gain
 - $\sim 10^6$ for two-stage type
 - Fast time response
 - Pulse raise time $\sim 500\text{ps}$, TTS $< 50\text{ps}$
 - can operate under high magnetic field ($\sim 1\text{T}$)

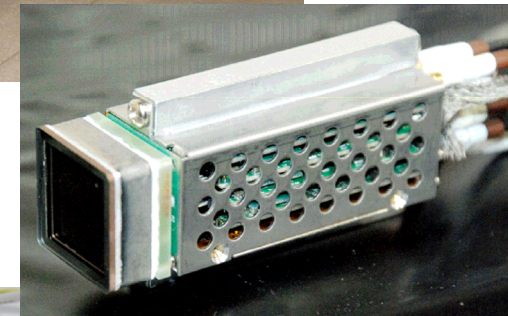


Quartz radiator

- Made by Okamoto optics
 - Size; 91.5 x 40 x 2 cm³
 - Flatness: <1.2μm/m
 - Roughness: <0.5nm
- Check the quality for time resolution
 - Single photon pulse laser
 - $\lambda=407\text{nm}$
 - MCP-PMT
 - Several incident position
- → No degradation of time resolution
 - Enough quartz quality

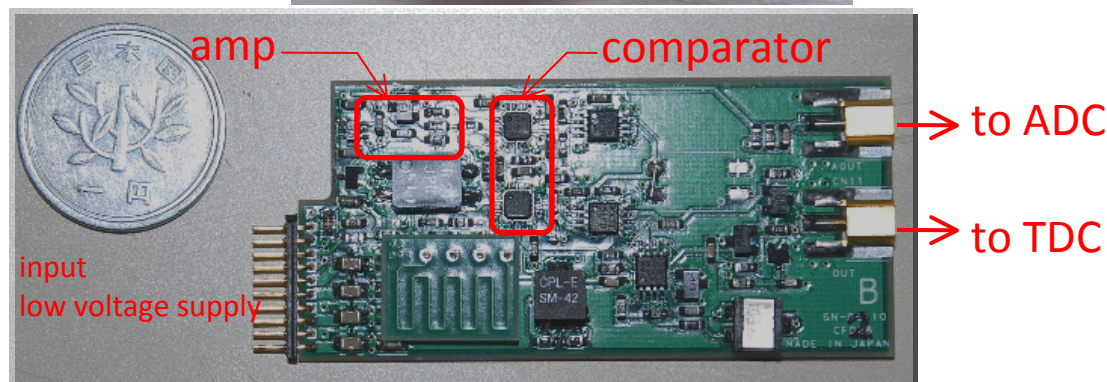


PMTモジュール



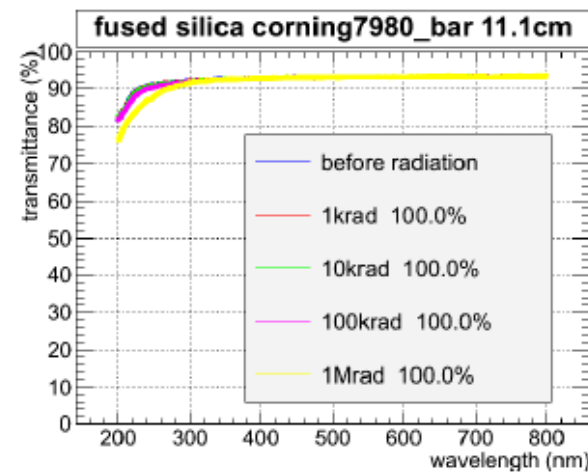
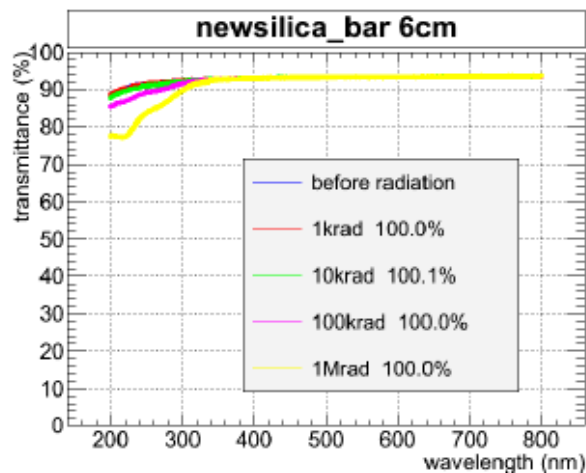
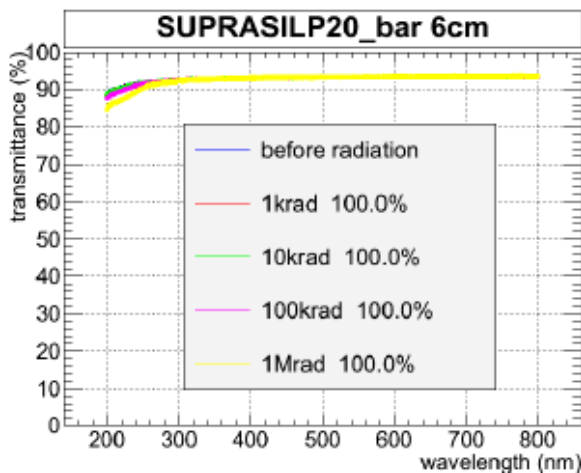
- HV divider + AMP + Discriminator
- 小型 (28mm^W)
- 試作機
 - 高速アンプ(MMIC, 1GHz, x20)
 - 高速コンパレータ (180ps propagation)
 - CFD with pattern delay

- 性能
 - Test pulse
 - ~5ps resolution
 - MCP-PMT
 - $\sigma < 40ps$

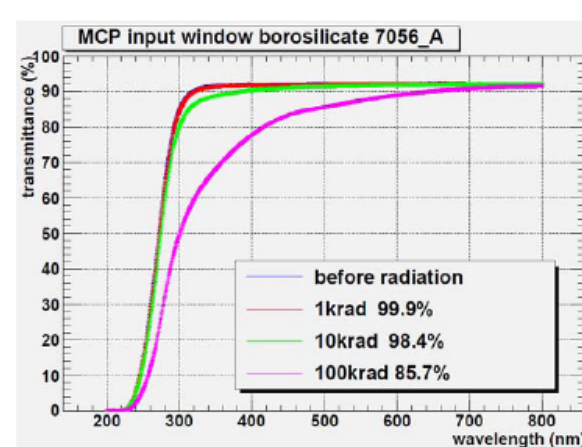
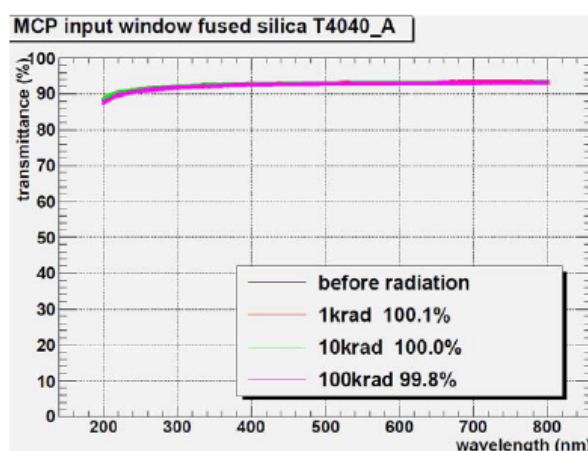
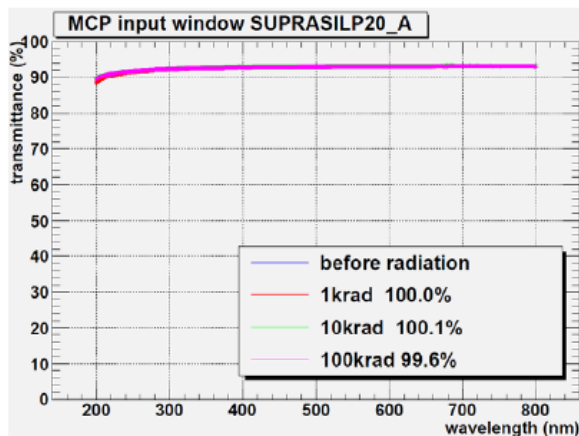


放射線照射後の透過率変化

- Quartz

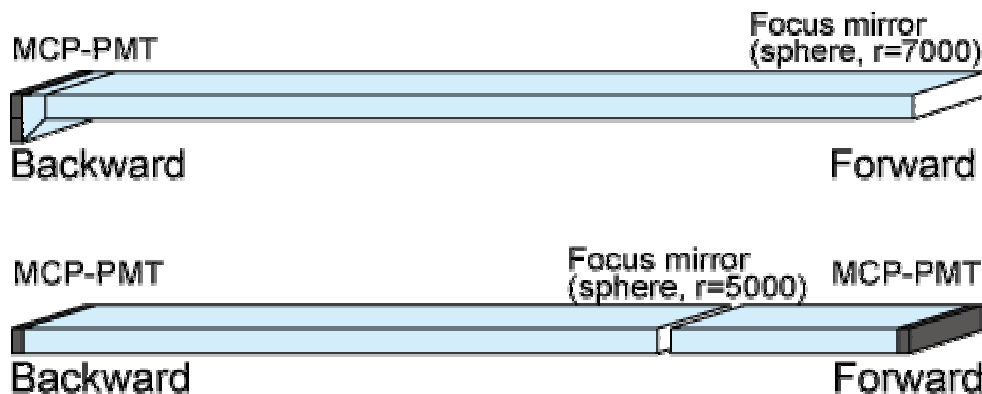


- MCP-PMT window



- Belle-IIで期待される放射線量に対して変化なし

- Two options
 - 1-bar/2-bar configurations
 - Use the similar detector components and technologies.
 - Same quartz radiator size, same MCP-PMT, same mirror shape
 - By simulation studies and prototype operations, we have confirmed the robustness against the timing jitter, tracking resolution, production readiness etc.



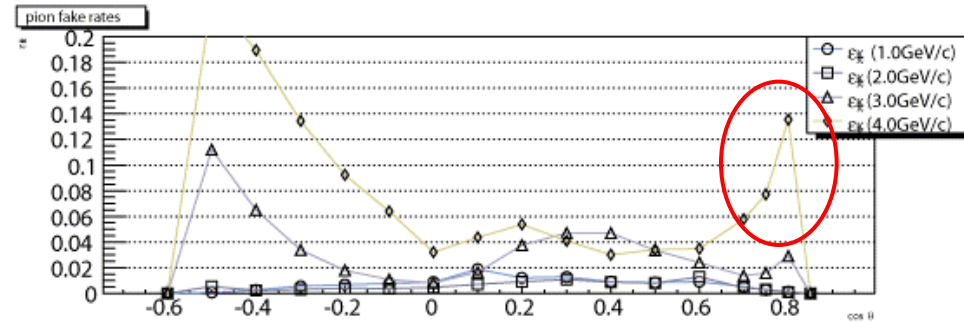
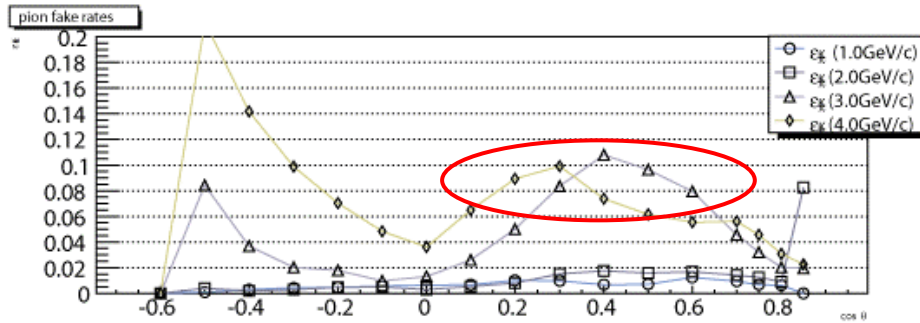
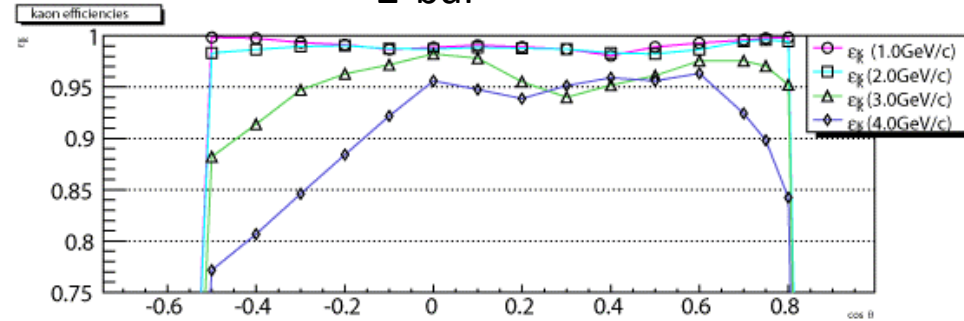
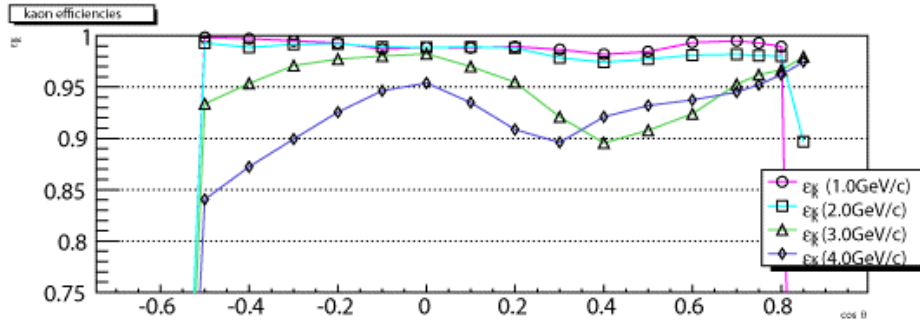
Performance



1-bar



2-bar



Incident angle fluctuation (1mrad)

Timing fluctuation (25ps)

Performance similar (weighted) for physics case studies

- For physics cases

From TDR

- Check by three simulation program

Table 7.8: Efficiencies and fake rates obtained from simulation for $B \rightarrow \pi\pi$, under the set of assumptions described in the text.

Geometry	Photocathode	K efficiency (%)			π fake rate (%)		
		GSIM	Geant4	stand-alone	GSIM	Geant4	stand-alone
2-bar	MA	95.8	97.3	96.2	2.6	2.4	3.7
1-bar	MA	93.4	95.5	96.7	5.2	3.9	3.1
2-bar	SBA	96.7	98.1	97.5	1.4	1.5	2.4
1-bar	SBA	95.4	97.2	98.5	3.3	1.9	1.4

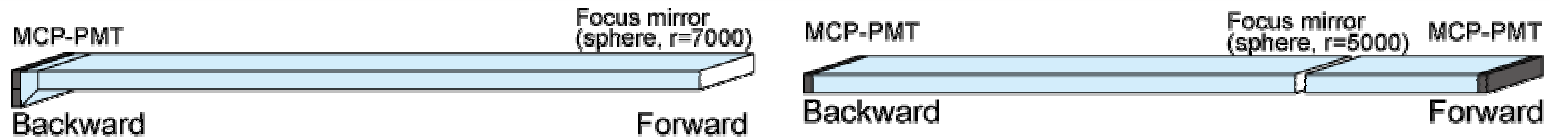
Table 7.9: Efficiencies and fake rates obtained from simulation for $B \rightarrow \rho\gamma$, under the set of assumptions described in the text.

Geometry	Photocathode	K efficiency (%)			π fake rate (%)		
		GSIM	Geant4	stand-alone	GSIM	Geant4	stand-alone
2-bar	MA	97.4	99.5	99.1	0.9	0.3	0.9
1-bar	MA	96.8	99.1	98.6	1.0	0.5	2.1
2-bar	SBA	97.7	99.8	99.6	0.8	0.1	0.4
1-bar	SBA	97.4	99.6	99.5	0.7	0.1	1.0

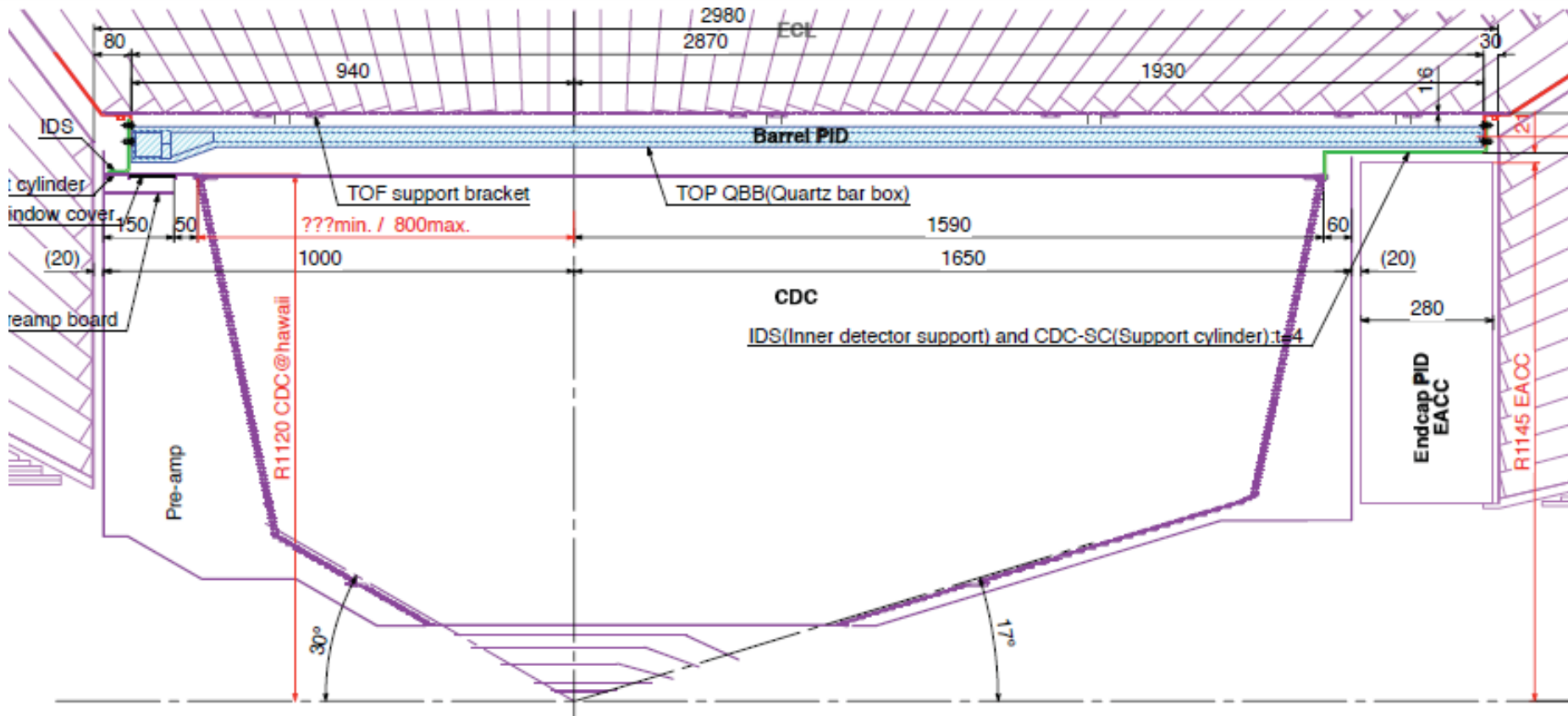
Nagoya Hawaii Ljubljana

- Chose 1-bar configuration due to practical considerations

Comparison

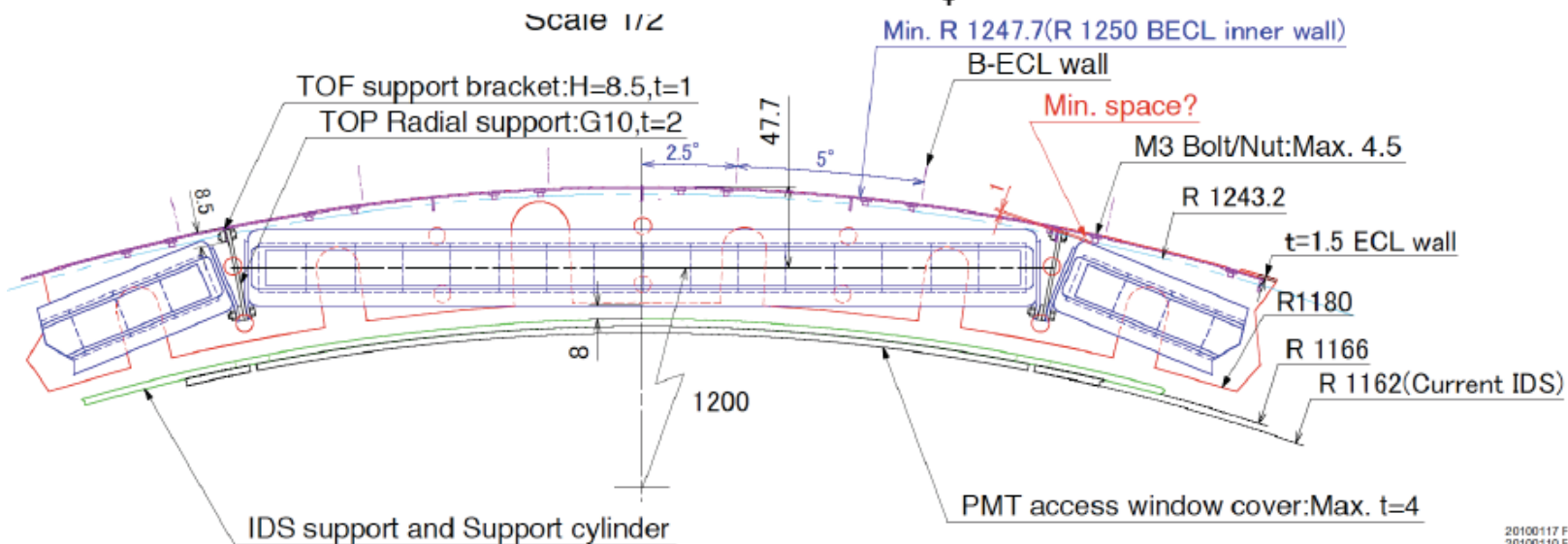
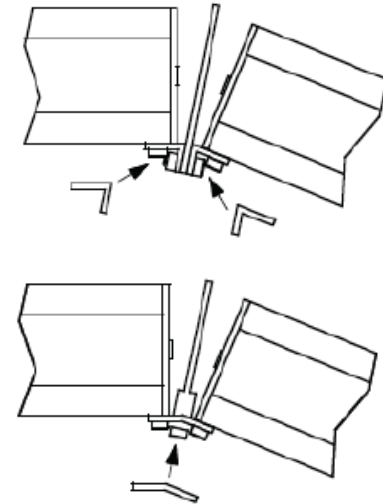


	1-bar	2-bar
Structure / configuration	Needs expansion block	Need forward PMTs + readout Strong bar box (between 2-bars)
TOP-CDC gap	Somewhat larger (~25mm)	Minimum
Acceptance	Larger in forward region (better overlap with endcap PID)	There is a small polar angle gap between the 2-bars
Readout	Backward	At both ends
Construction	Needs test of prototype	2m prototype
Performance	Better in the most forward acceptance	Better for mid-forward polar angles Slightly better overall
Note	Track extrapolation resolution (<2mrad)	Timing determination (<30ps) for forward (Need precise calib. of 25ps)



- Check possible detector size and support
 - Quartz length, width, thickness
 - Minimize dead space and material

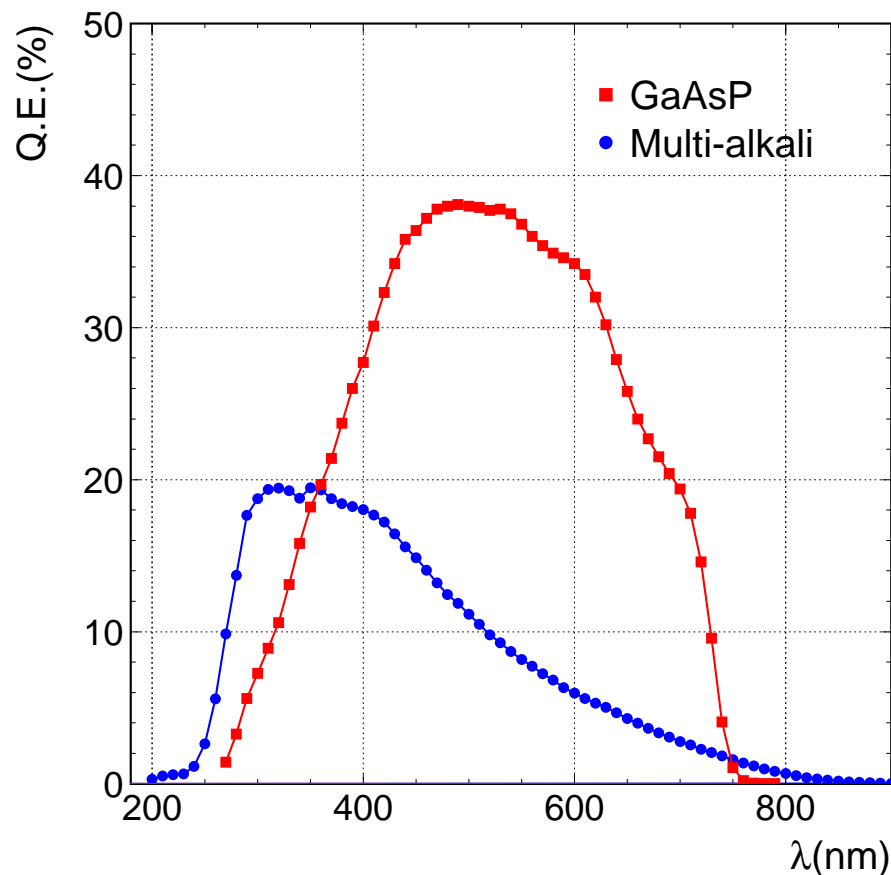
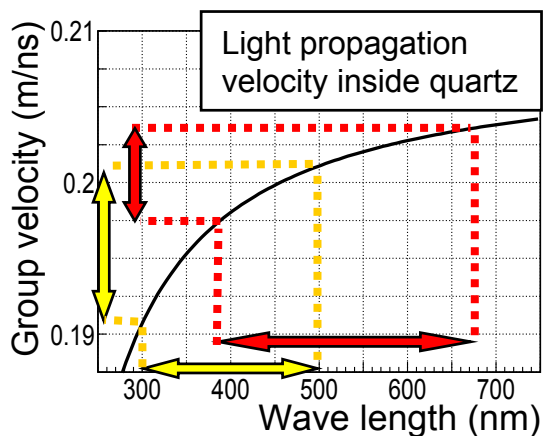
- Maximize the single module performance under the following constraints.
 - Reuse the existing ECL container.
 - Quartz bar dimension
 - W:400 - 500 mm x T:~20 mm
 - 16 azimuthal segments ($\phi = 22.5$ deg.)
 - Maximize the azimuthal coverage ($\eta_{\phi} = 95$ %)



20100117 F
20100110 F

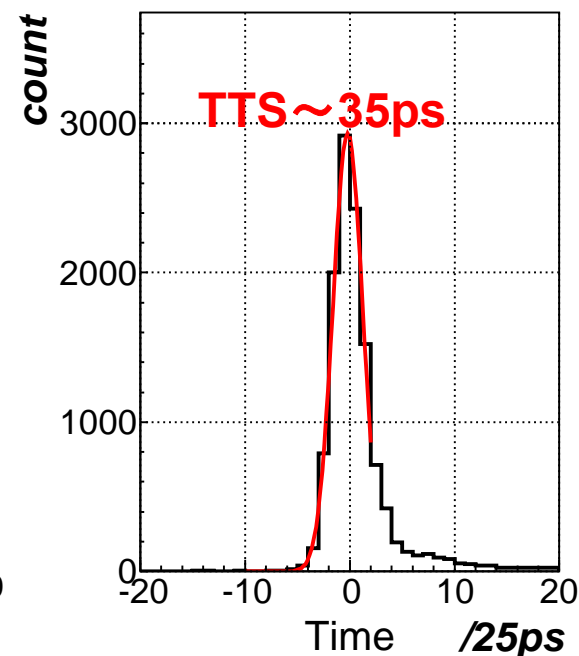
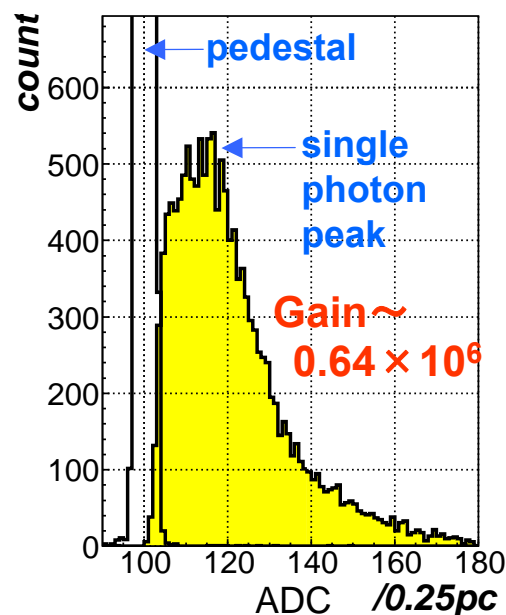
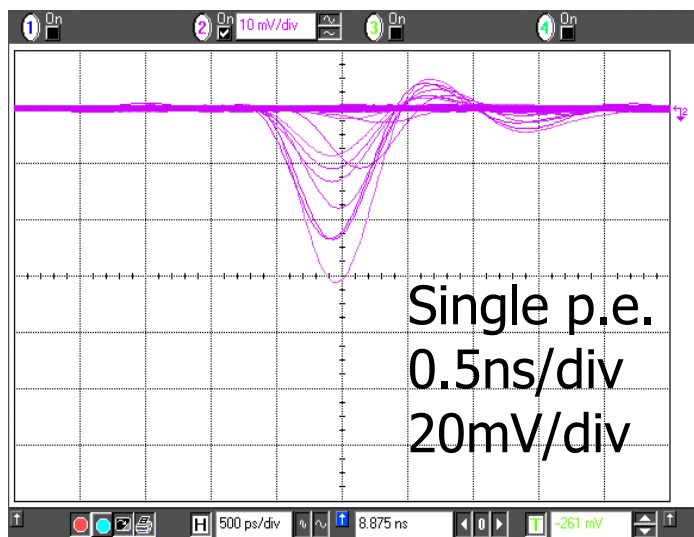
GaAsP MCP-PMT; Q.E. 分布

- プロトタイプ
- マルチアルカリ光電面と比較して
- 良い量子効率
 - >35% at 500nm
- 長波長に感度



GaAsP MCP-PMT 基本性能

- 一光子照射時の出力波形, ADC, TDC分布



- 一光子を検出するために十分なゲイン
- 35psの十分良い時間分解能
- ダークカウント: 数kHz
 - MCP増幅部は正常に動作
 - 光電面の時間分解能に対する影響は少ない