

144ch マルチアノード型光検出器 HAPD の性能評価

東京都立大学大学院理学研究科

物理学専攻 修士課程

高エネルギー実験研究室

履修番号 0383495 山本 俊悟

概要

Belle 実験は、高エネルギー加速器研究機構の電子陽電子非対称エネルギー衝突型円形加速器 (KEKB) によって B 中間子を大量に生成し、B 中間子の崩壊事象から標準モデル中の小林・益川理論によって説明される CP 対称性非保存の検証を行っている。KEKB 加速器は高精度な加速器装置群からなり、世界最高のルミノシティ ($L = 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) を上げつつ、2006 年までの稼動が予定されている。その後、更なる新事象の検出を目標に、KEKB として稀有な確率の事象を検出しようとする計画が立ちあげられている。私たちはこの Super-KEKB での物理に対応するために Belle 検出器の性能向上を目的として、検出器の研究開発を行っている。Belle 検出器の中で私が所属する K/π 中間子識別グループ (PID グループ) では、高い粒子識別能力をもった検出器によって貢献しようとしている。

現在の Belle 検出器の K/π 識別能力は K 中間子 (π 中間子) の識別能力は 90% で、 π 中間子 (K 中間子) の混在する割合は 10% 以下となっている。そこで、更なる粒子識別能力向上を目標に Belle の PID グループではアップグレード検出器として、A-RICH (Aerogel-Ring Imaging Cherenkov counter) 検出器を採用することを計画している。

A-RICH 検出器とは、粒子識別の対象となる荷電粒子が輻射体を通過する際に放射される Cherenkov 光を位置分解能の備わっている光検出器によって測定し、光子の検出器上の位置情報から Cherenkov 光の放射角を再構成し、荷電粒子の速度を求めるものである。このための A-RICH 検出器は、輻射体としてシリカエアロゲルを採用し、「十分な有効面積および位置分解能」を併せ持ち、且つ「1.5T の磁場中で稼動」する光検出器を開発することにした。このため、私たちは A-RICH 検出器において高い透過率を有するシリカエアロゲル、新型のマルチアノード光検出器の研究開発を行っている。

この A-RICH 用光検出器として、新型マルチアノード光検出器 (Hybrid Avalanche Photo Detector, HAPD) を浜松ホトニクス株式会社と共同開発している。この新型光検出器は、真空管の中に Avalanche フォトダイオード (APD) を配置し、APD のキャリアを信号とする新しい光検出器である。光電効果で発生した光電子を高電圧で加速しおよそ 8keV のエネルギーを与える。この光電子が逆バイアス電圧で保持された APD に打ち込まれ、1 光電子の入射に対しておよそ 2000 の電子・正孔対 (キャリア) が生成され、逆バイアス電圧によってこのキャリアを信号として検出する。キャリアは Avalanche 効果によっておよそ 10 倍され、1 光子あたり 20000 電子を信号としている。

私は A-RICH 検出器の研究開発において、このマルチアノード型 HAPD の性能評価に携わってきた。HAPD は現在試作段階であるため、1 台の HAPD でも A-RICH 検出器としての性能を評価できるようにしたい。そこで、小さな有効面積内に Cherenkov 光を集光する Compact RICH 検出器を考案。この Compact RICH 検出器の性能をフラットパネル型光検出器 (浜松ホトニクス、H8500) によって評価した。本論文ではこの Compact RICH の性能評価を交え、今回完成された 144 channels HAPD の性能評価について報告する。

目次

概要	1
第1章 はじめに	1
1.1 KEKB から Super-KEKB へ	1
1.2 Super-KEKB のための A-RICH 検出器	1
1.3 A-RICH 用光検出器 HAPD	3
1.4 本研究の目的	3
第2章 Belle	4
2.1 Belle 実験	5
2.2 Belle 検出器	6
2.3 K/π 粒子識別を担う ACC	8
第3章 A-RICH	10
3.1 EndcapACC の改善点	10
3.2 A-RICH 検出器	11
3.2.1 シリカエアロゲル	13
3.2.2 光検出器	14
第4章 Beam Test	16
4.1 Compact RICH 検出器	16
4.1.1 シミュレーション	17
4.2 測定	21
4.2.1 実験準備	21
4.2.2 結果	23
4.2.3 考察	27
第5章 HAPD	30
5.1 HAPD	30
5.1.1 APD	30
5.1.2 検出器構造	32
5.1.3 A-RICH 用光検出器 HAPD	34
5.2 測定	34
5.2.1 結果	40
5.2.2 考察	54

第 6 章 結論	69
6.1 Compact RICH 検出器について	69
6.2 HAPD について	69
6.3 A-RICH 検出器について	70
6.4 今後の課題	71
付 録 A 144 channels HAPD データ (提供:浜松ホトニクス)	73
謝辞	80

目次

2.1	電子陽電子非対称エネルギー衝突型円形加速器：KEKB	4
2.2	Unitarity triangle	5
2.3	Belle 検出器の断面図	6
2.4	ACC における K/π 中間子運動量識別範囲	8
2.5	Belle 検出器における K/π 中間子識別を担う副検出器の識別能力	9
3.1	荷電粒子速度 β と Cherenkov 角 θ の関係	12
3.2	RICH 検出器の種類	13
3.3	シリカエアロゲル：写真とゲル構造	14
3.4	荷電粒子運動量 2.0GeV のときの輻射体屈折率と Cherenkov 角の関係性	15
4.1	凸レンズを Cherenkov 光の集光として用いた Compact RICH 検出器概念図	17
4.2	Cherenkov 角の再構成方法	18
4.3	Compact RICH 検出器におけるレンズ表面での Cherenkov リング半径の理想値の輻射体屈折率による変動	18
4.4	A-RICH 検出器及び Compact RICH 検出器のシミュレーション	20
4.5	シミュレーションによる輻射体 - 光検出器間距離の Cherenkov 角の分解能 σ_θ への寄与	20
4.6	Beam Test 実験のセットアップ (写真)	21
4.7	RICH 検出器のセットアップ	22
4.8	A-RICH 検出器 (写真)：シリカエアロゲルとマルチアノード光検出器 FP-PMT (浜松ホトニクス、H8500 4×4 array)	24
4.9	Compact RICH 検出器 (写真)：シリカエアロゲル、レンズ、1辺 74mm の穴を開けた遮光付 FP-PMT	24
4.10	π^- ビーム 1 track あたりに発生する Cherenkov 光の光検出器上の分布	25
4.11	測定項目 1. の結果： π^- 運動量 $2.0\text{GeV}/c$ 、輻射体 - 光検出器間距離を 200mm に設定したときの Cherenkov 角の再構成、及び Cherenkov リング	26
4.12	測定項目 2. の結果： π^- 運動量 $2.0\text{GeV}/c$ 、輻射体 - 光検出器間距離を 140mm に設定したときの Cherenkov 角の再構成、及び Cherenkov リング	26
4.13	測定項目 3. の結果：Compact RICH 検出器を使用した結果、 π^- 運動量 $2.0\text{GeV}/c$ 、輻射体 - 光検出器間距離を 140mm に設定したときの角度の再構成、及びリング	27
5.1	半導体の p-n 結合	31
5.2	光電子増倍管の構造断面の模式図	32
5.3	Hybrid Photo Detector 構造断面の模式図	33

5.4	3×3 channels HAPD の外観及び寸法	35
5.5	144 channel HAPD の外観及び寸法	36
5.6	DAQ システム	38
5.7	APD シグナル取得用回路: 印加逆バイアス電圧の極性による違い	39
5.8	3×3 channels HAPD 負逆バイアス電圧印加時の photon 応答: $T_M = 0.5\mu s$	42
5.9	3×3 channels HAPD 正逆バイアス電圧印加時の photon 応答: $T_M = 0.5\mu s$	43
5.10	逆バイアス電圧極性によるゲイン差	45
5.11	整形時定数 T_M の single photon に対応する波高分布への寄与 (負極性逆バイアス電圧)	46
5.12	整形時定数 T_M の single photon に対応する波高分布への寄与 (正極性逆バイアス)	47
5.13	整形時定数 T_M の信号への寄与:APD に負極性の逆バイアス電圧を印加したときの mean 値 (μ) noise(FWHM) 及び N_σ の変動	48
5.14	整形時定数 T_M の信号への寄与:APD に正極性の逆バイアス電圧を印加したときの mean 値 (μ) noise(FWHM) 及び N_σ の変動	49
5.15	144 channels HAPD 用信号観測システム	51
5.16	144 channels HAPD の雑音評価 (CLEAR-PULSE580K,4032 使用時)	56
5.17	オシロスコープでの photon response 観測 1: 144 channels HAPD chip-D の dead channel に電圧を印加した場合	57
5.18	オシロスコープでの photon response 観測 2: 144 channels HAPD chip-D の dead channel を除いて電圧を印加した場合	57
5.19	144 channels HAPD chip-D ch-22 のシグナル:LED により single, multi-photon 照射、分布は pedestal の平均を 0 に合わせ、threshold 電圧のイベントで規格化した後 pedestal を引いて表示	58
5.20	APD 逆バイアス電圧による 1 光電子波高分布への影響	59
5.21	光陰極印加電圧による 1 光電子波高分布への影響	59
5.22	144 channels HAPD chip-D ch-22 における 1 光電子波高分布の整形時定数依存性、分布は pedestal の平均を 0 に合わせ、それぞれ threshold 電圧のイベントで規格化した後 pedestal を引いて表示	60
5.23	144 channels HAPD chip-D ch-22 における single photon 波高分布の整形時定数依存、 T_M による mean 及び noise、 N_σ の違いを表示	61
5.24	144 channels HAPD chip-D ch-22 における入射位置及び入射角度を変えたときのシグナル分離度 N_σ の様子、ラインは $N_\sigma = 4.1$ を表す	62
5.25	144 channels HAPD chip-D における各 channel から取得された波高分布、全ての channel のイベントを規格化して表示	63
5.26	144 channels HAPD chip-D における効率、threshold 電圧以上のイベントを数え、ch-36 のイベント数に対する割合で示したもの	64
5.27	144 channels HAPD chip-D におけるシグナル分解能 N_σ 、イベント数の得られなかった ch-23 を除いて表示	65
5.28	1 pixel 内の cross talk: 144 channels HAPD chip-D ch-22 の pixel 内で直径 1mm のライトスポットを $500\mu m$ 間隔で照射したときの波高分布図	66

5.29	144 channels HAPD chip-D の ch-22 への cross talk: Target channel のイベント数を 100% とし各 channel の影響度、10% 以上の影響度をもつ channel をグレーで表示	67
5.30	ライトスポットの広がり の考察	68

表 目 次

2.1	Unitarity Triangle のパラメータ	6
2.2	Belle 検出器の観測対象となる粒子	6
2.3	Belle 検出器の構成	7
3.1	輻射体の種類とそれぞれの屈折率	11
3.2	Super-KEKB に向けた RICH 検出器への要請	15
4.1	有効面積の小さい光検出器で A-RICH 検出器を構成したときの Cherenkov 光放射角度の分解能に寄与すると考えられる問題点	16
4.2	Compact RICH 検出器に用いたシリカエアロゲル (NP-1) の規格	19
4.3	Compact RICH 検出器に採用した凸レンズの規格	19
4.4	実験セットアップに用いた検出器群	22
4.5	FP-PMT(H8500) の規格 (参考資料: 浜松ホトニクス)	23
4.6	各測定項目における Cherenkov 角度情報	27
4.7	実験機器の役割とそれに対応するシミュレーションの働き	28
4.8	シミュレーションにおける Cherenkov 角度情報	28
5.1	3×3 channels HAPD の規格 (提供: 浜松ホトニクス株式会社)	34
5.2	3×3 channels HAPD の特性 (提供: 浜松ホトニクス株式会社、測定値)	34
5.3	144 channels HAPD の規格 (提供: 浜松ホトニクス株式会社)	37
5.4	144 channels HAPD の特性 (提供: 浜松ホトニクス株式会社、測定値)	37
5.5	3×3 channels HAPD 測定諸設定	41
5.6	整形時定数を変化させたときの 1 光電子波高分布の mean、noise に対して fit したときの parameter	44
5.7	144 channels HAPD の 1 channel 読み出し時の設定	50
5.8	波高分布の mean の変動に 1 次関数によって fit したときの parameter	52
5.9	整形時定数 T_M が mean 値に与える影響: 1 次関数によって fit したときの parameter	52
5.10	144 channels HAPD 測定に用いた Stage controller 諸設定 : $1L=2\mu\text{m}$	53
5.11	雑音を最小にする整形時定数 T_M^{min}	54
6.1	測定項目のまとめと評価	70

第1章 はじめに

1.1 KEKB から Super-KEKB へ

加速器を用いる素粒子実験、高エネルギー実験は今日さまざまな加速器によって、実験が行われている。多くは、標準モデルの検証や、標準モデルを超える新しい物理の探索を目標にしている。Belle 実験は稀有な事象探索を試みる実験の1つである。Belle 実験の目的は、標準モデルの検証、なかでも CP 対称性非保存の起源を見つけることである。標準モデルに含まれる CP 対称性の非保存は、CKM 行列要素の V_{ub} 、 V_{td} の位相による効果である。この行列要素を決定するため、高エネルギー実験では、チャームやボトムクォークを含む質量の重いハドロンを加速器によって生成し、別のハドロンへ崩壊する過程を調べている。特に、Belle 実験では、非対称なエネルギーを持つ電子と陽電子を衝突させることで、 b クォークを含む B 中間子を大量に生成し、 B 中間子の崩壊過程の測定を行っている。Belle 実験は世界最高のルミノシティ ($L = 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) を誇る電子・陽電子非対称エネルギー衝突型円形加速器 (KEKB) と、CKM 行列要素の決定のための高精度な測定装置 (Belle 検出器) によって構成されている。

Belle 検出器は様々な機能を持った副検出器群によって構成され、これらの副検出器は各々の測定対象とする物理量に合わせて設計されている。これらの副検出器の中に、 B 中間子崩壊を調べる上で重要な役割を果たす粒子識別装置がある。その中の1つ ACC (Aerogel Cherenkov Counter) は、高運動量領域における K/π 中間子識別を目的としている。 K 、 π 中間子の識別により、 K 中間子を含んだ崩壊過程であるか、 π 中間子を含んだ崩壊過程であるかを知ることが可能となり、 B 中間子の崩壊を調べる上で重要な役割を担う。Belle 検出器には、 K/π 中間子識別を担う副検出器として ACC のほかに、エネルギー損失量の測定から低運動量領域の粒子識別を行う CDC (Central Drift Chamber)、粒子の飛行時間を測定する TOF (Time of Flight Counter) がある。現在の Belle 検出器の K/π 中間子識別能力は、この3つの K/π 中間子識別用検出器によって、全データ量に対して 90% の $K(\pi)$ /他のハドロン識別、80% の K/π 識別である。Belle 実験は現状の粒子識別能力で、2006 年までの稼働が予定されている。その後、高精度な検出器を用いてより高統計な測定で稀な事象の物理を捉える Super-KEKB が計画されている。この Super-KEKB では 95% 以上の K/π 識別能力が要求されている。

1.2 Super-KEKB のための A-RICH 検出器

Super-KEKB は現在の Belle 検出器の支持構造体を利用し、Belle 検出器を構成する副検出器の性能を上げることで、稀有な確率で起こる B 中間子の崩壊事象の観測を目的に立ち上げられた実験計画である。Belle 検出器の K/π 中間子識別を担う副検出器の1つである、

私の所属する ACC グループでは、新たな識別装置を導入することで性能向上を行う。そのため、この新しい装置の研究開発を現在行っている。

ACC は、シリカエアロゲルを用いたユニークな K/π 粒子識別装置である。ACC による K/π 識別は屈折率 n のシリカエアロゲルを輻射体とし、荷電粒子の速さ v が輻射体中の光の速さ c/n を超えたとき、即ち

$$\beta > \frac{1}{n},$$

$$\beta = \frac{v}{c}$$

の条件のときに発生する Cherenkov 光を利用している。このため、Cherenkov 光の発生に対して、荷電粒子の運動量に閾値が存在する。現在の識別装置では π 中間子が Cherenkov 光を放出させ、 K 中間子は放出しない運動量領域の荷電粒子を対象にし、光を測定する装置が鳴ればシリカエアロゲルを通過した粒子は π であると判断する。この閾値型検出器 ACC は円筒型の Belle 検出器の筒にあたる部分 (Barrel) と、筒のフタにあたる部分 (Endcap) に設置されている。現状での問題点は、EndcapACC で、高運動量領域の粒子が飛来するもシリカエアロゲルの屈折率が高いため、高運動量の粒子の測定が不十分であることである。さらに、 K 中間子がシリカエアロゲルの原子に衝突したときに放出される電子 (knock-on 電子) によって Cherenkov 光が放出されてしまうという点がある。

そこで私たちは、より広範な運動量領域の粒子を捉え、且つ knock-on 電子に左右されない新しい検出器の研究開発を行っている。この検出器を A-RICH (Aerogel-Ring Imaging Cherenkov) 検出器という。A-RICH 検出器では Cherenkov 光の放射角度を検出した光子の位置情報から幾何学的に求めることによって粒子識別を行う。そのため、 π 、 K 中間子に対し共に Cherenkov 光を放出する屈折率のシリカエアロゲルを採用することで高い運動量の粒子を捉えることが可能となる。また、この放射角度を Cherenkov 光 1 つ 1 つから導出することができるため、knock-on 電子に左右されにくい。

A-RICH 検出器の荷電粒子識別は次のように行われる。各時刻に輻射体から発生した Cherenkov 光は同一面上に並ぶ。そのため、放射角度を θ_C とし、輻射体中での荷電粒子の速さ v とすると θ_C と v の間には

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

の関係が成り立つ。この Cherenkov 角 θ_C を A-RICH 検出器によって導出し、荷電粒子の速度 v を求めることができる。荷電粒子の運動量 p は、Belle 検出器全体にかけられた磁場 $B[\text{T}]$ によって曲げられた荷電粒子の飛跡の曲率 $\rho[\text{m}]$ から $p[\text{GeV}/c] = 0.3\rho B$ で求められる。速度と運動量には、荷電粒子の質量を m として

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

の関係があるため、既知の p と求められた v から質量 m 、即ち粒子を識別できる。

このため、より多くの Cherenkov 光を高い位置精度で検出できるように A-RICH 検出器には十分な有効面積と位置分解能を併せ持った光検出器が必要である。

1.3 A-RICH用光検出器 HAPD

A-RICH 検出器の光検出器には、十分な有効面積、且つ位置分解能が必要である。また、Belle 検出器には検出器の z 軸と平行に 1.5T の磁場が荷電粒子の運動量測定のためかけられている。このため、Belle 検出器の Endcap 部に設置される RICH 用光検出器は磁場中での稼働が要求される。更に、A-RICH 検出器が検出する光子は、1pixel あたり single photon 程度であるため、光検出器の能力として single photon シグナルを検出することが要求される。これらの条件を考慮し、浜松ホトニクス株式会社と共同で新型マルチアノード型光検出器の開発研究を行っている。この新型光検出器は真空管を用いた光検出器技術と半導体技術の融合によって生み出されたことから HAPD (Hybrid Avalanche Photo Detector) と名づけられた。

HAPD は Si 半導体素子を真空管内に配置し、半導体素子の作り出す電子・正孔対 (キャリア) を信号とする。このキャリアは、高電圧によっておよそ 8keV のエネルギーを与えられた光電子が半導体素子に入射することによって生成される。半導体素子の材質 Si が入射エネルギー 3.64eV と小さなエネルギーで 1 対のキャリアを生成する特徴を持つため、この光電子打ち込みによるキャリア数が大きく、信号の揺らぎは小さくなり、1 光電子の応答が得られる。また、Belle 検出器の磁場ベクトルと HAPD 内の電場ベクトルがほぼ平行となる Endcap 部では、HAPD の信号の揺らぎは無磁場中と遜色のない大きさが期待される。

現在この HAPD は、浜松ホトニクスで試作中である。

1.4 本研究の目的

本研究の目的は、この新型マルチアノード光検出器の現状での性能を評価することである。

HAPD の性能評価は、昨年度に本研究科、関 貴之氏の修士論文にて有効面積の小さな single channel、 3×3 channels HAPD の性能評価が行われている。今回、実際に Super-KEKB の A-RICH 検出器に採用予定である大有効面積 144 channels HAPD の試作器が完成された。よって、本論文ではこの 144 channels HAPD の性能評価の結果について報告する。

第2章 Belle

Belle 実験で使用される電子・陽電子非対称エネルギー衝突型円形加速器 KEKB は、 B 中間子を大量に生成することから B -factory とよばれている。KEKB では、電子を $8.0\text{GeV}/c$ 、陽電子を $3.5\text{GeV}/c$ まで加速することにより、重心系でのエネルギーが $10.58\text{GeV}/c$ となる。電子と陽電子の運動量を非対称とすることで、衝突により生成される $\Upsilon(4s)$ は実験室系での速度を保つ。これにより、 $\Upsilon(4s)$ から崩壊してできる B (あるいは \bar{B}) 中間子を Lorentz Boost させることが可能となる。この Lorentz Boost によって $B(\bar{B})$ 中間子の崩壊寿命は見かけ上延長され、 B 中間子と \bar{B} 中間子の崩壊時間差の測定を可能にしている。この電子と陽電子の非対称な運動量が Belle 実験には不可欠である。KEKB 加速器のリングを形成するビームパイプは電子用、陽電子用各 1 本ずつ計 2 本あり、電子と陽電子は図 2.1 の TSUKUBA Area の 1 点においてのみ衝突を起こすことが許されている。

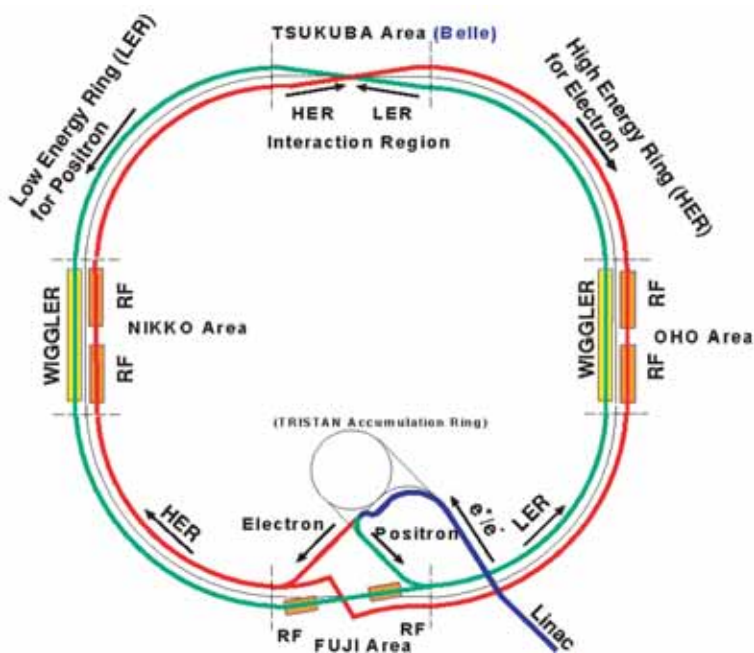


図 2.1: 電子陽電子非対称エネルギー衝突型円形加速器 : KEKB

衝突点では電子と陽電子のビームは正面衝突させるのではなく、 22mrad の角度をつけて衝突させる。これによって、1つのリング内に蓄積できる電子(あるいは陽電子)数の上限を引き上げることができ、また衝突後の各粒子を元のビームパイプに戻すための装置(例:磁石)を必要としないため衝突点付近の複雑な機構を避けることができる。各リングには 5000 bunch(1 bunch $\sim 10^{10}$ electron/positron)の電子、陽電子を $\sim 60\text{cm}$ 間隔に並べることが可能で、衝突付近での bunch の大きさはおよそ $L \times H \times W = 4 \times 0.008 \times 0.3\text{mm}^3$

程度になる。また高強度ルミノシティ $L = 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ により、年間およそ 10^8 個の B 中間子対を生成している。

2.1 Belle 実験

Belle 実験は 1999 年 5 月末から開始され、KEKB によって小林、益川氏の提唱した CKM (Cabbibo-小林-益川) 行列要素の決定、及び CP 対称性非保存の起源を明らかにすることを目的としている。この検証に様々な B 中間子の崩壊モードの測定をより高い精度で行うことが要求される。また、標準モデルによって物理が完全に閉じているとすると CP 対称性非保存という事象は CKM 行列要素に含まれる無視することのできない程度に大きい複素位相によるものとされている。したがって CKM 行列要素を測定すると同時に CP 対称性非保存の起源を検証する。

弱い相互作用による世代間混合を表す行列は世代を 3 世代であると仮定すると、一般に

$$\begin{bmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ s \\ b \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

式 2.1 で表現され、これを CKM 行列と呼ぶ。これを Wolfenstein の式で表すと、

$$\begin{bmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{\lambda^2}{2} & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \frac{\lambda^2}{2} & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ s \\ b \end{bmatrix} + \mathcal{O}(\lambda^4) \quad (2.2)$$

となり、以下のように CKM 行列 V_{CKM} に unitarity を要請すると、以下の式が導かれる。

$$\begin{aligned} V_{\text{CKM}}^\dagger V_{\text{CKM}} &= \delta \\ (V_{\text{CKM}}^\dagger V_{\text{CKM}})_{13} &= V_{ub}^* V_{ud} + V_{cb}^* V_{cd} + V_{tb}^* V_{td} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

この式 2.3 を幾何学的に複素数平面上に表記することができる (図 2.2)。これは Unitarity Triangle と呼ばれる。

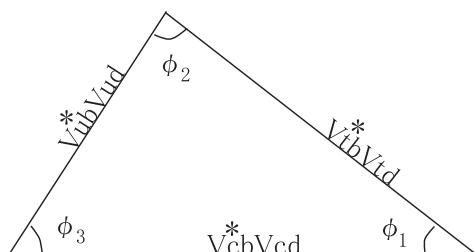


図 2.2: Unitarity triangle

Belle 実験ではこの Triangle の 3 辺、及び 3 つの角度を決定することで CKM モデルの検証を行っている。Unitarity Triangle を決定するためには、高精度で 3 辺 3 角を測定する必要がある。図 2.2 の Unitarity Triangle のパラメータ 3 辺 $V_{ub}^*V_{ud}$ 、 $V_{cb}^*V_{cd}$ 、 $V_{tb}^*V_{td}$ 及び 3 角 ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 とそれぞれの実験において必要な観測事象を表 2.1 にまとめた。

パラメータ	観測事象
$V_{ub}^*V_{ud}$	$ V_{ud} $ — known, $ V_{ub} $ — decay mode: $b \rightarrow ul\nu_l$
$V_{cb}^*V_{cd}$	$ V_{cd} $ — known, $ V_{cb} $ — decay mode: $b \rightarrow cl\nu_l$
$V_{tb}^*V_{td}$	$B^0\bar{B}^0$ mixing: $b \leftrightarrow t \leftrightarrow d$
ϕ_1	IDCPV: $B^0(t) \rightarrow J/\Psi K_S$ & $\bar{B}^0(t) \rightarrow J/\Psi K_S$
ϕ_2	IDCPV: $B^0(t) \rightarrow \pi^0\pi^0 / \pi^+\pi^-$ & $\bar{B}^0(t) \rightarrow \pi^0\pi^0 / \pi^+\pi^-$
ϕ_3	DCPV: $B^\pm \rightarrow (D^0, \bar{D}^0, D_{CP})K^\pm / B^0(\bar{B}^0) \rightarrow (D^0, \bar{D}^0, D_{CP})K_S$

表 2.1: Unitarity Triangle のパラメータ

表 2.1 に見られるように、 B 、 \bar{B}^0 中間子のある特定の崩壊過程を他の崩壊過程と区別することが CP 対称性非保存の検証に必要であり、Belle 実験ではこのような崩壊過程に現れる粒子を効率よく検出することが要となっている。対象とするこれらの粒子のうち崩壊寿命の短いものは直接観測することができない。そのため Belle 検出器はその崩壊先に現れる粒子を観測している。(表 2.2 参照)

$$\overline{\gamma \ e^\pm \ \mu^\pm \ \pi^\pm \ K_L \ K^\pm \ p \ n}$$

表 2.2: Belle 検出器の観測対象となる粒子

2.2 Belle 検出器

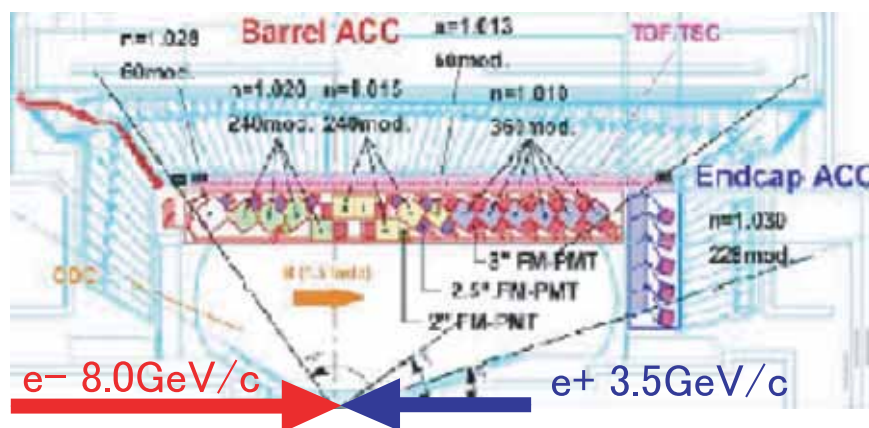


図 2.3: Belle 検出器の断面図

Belle 検出器		
副検出器	役割	能力
SVD (Silicon Vertex Detector)	B 中間子の崩壊点の測定	位置分解能 80[μm]
CDC (Central Drift Chamber)	荷電粒子の運動量測定	飛跡分解能 $0.3\%\sqrt{1+p^2}[\text{GeV}/c]$
	低エネルギー領域の K/π 識別	エネルギー損失分解能 $6\%E[\text{GeV}/c]$
ACC (Aerogel Cherenkov Counter)	高運動量領域での K/π 識別	識別可能範囲 $1.2 < p < 3.5[\text{GeV}/c]$
TOF (Time-of-Flight Counter)	低運動領域の K/π 識別	時間分解能 100[ps]
		識別可能範囲 $1.2 < p < 3.5[\text{GeV}/c]$
ECL(CsI) (Electromagnetic Calorimetry)	γ 、電子のエネルギー測定	エネルギー分解能 $1.3\%\sqrt{E}[\text{GeV}/c]$
KLM (K_L and Muon Detector)	K_L/μ 識別	角度分解能 30[mrad] 時間分解能 1[ns]

表 2.3: Belle 検出器の構成

電子陽電子ビームの衝突点図 2.1 TSUKUBA Area に設置されている Belle 検出器の断面を図 2.3 に示す。

Belle 検出器はビーム軸と同軸になるよう円筒形状をしている。この検出器の中で陽電子入射側を前方 Endcap、電子入射側を後方 Endcap、筒状の部分を Barrel と呼ぶ。Belle 検出器はその観測対象、役割によって 6 種類の副検出器から構成されている表 2.3 に各副検出器の役割とその性能をまとめた。

2.3 K/π 粒子識別を担う ACC

前節のように、Belle 実験において K/π 粒子識別は B 中間子の崩壊過程を観測するために重要であり、CKM 行列要素を決定する鍵となっている。特に観測事象が B^0 、あるいは \bar{B}^0 中間子からの崩壊過程であるかを判別するために、この K 中間子と π 中間子の識別が必要となる。

K/π 粒子識別を担う副検出器の中に ACC(Aerogel Cherenkov Counter) がある。ACC は荷電粒子が輻射体を通過する際に放射する Cherenkov 光を利用した検出器である。ACC はシリカエアロゲルを輻射体とし、この Cherenkov 光を検出したかどうかによって K/π 粒子識別を行っている。 K/π 粒子識別は Cherenkov 光の発生条件

$$\beta > \frac{1}{n} \quad (2.4)$$

を利用している。このため、Cherenkov 光の発生に対して荷電粒子は閾値運動量 $p_{\text{threshold}}$

$$p_{\text{threshold}} = \frac{m\beta}{\sqrt{1 - (\frac{1}{n})^2}} = \frac{mc}{\sqrt{n^2 - 1}} \quad (2.5)$$

を持つ。ただしここで、輻射体の持つ屈折率を n 、荷電粒子速度を β 、荷電粒子の静止質量を m 、光速を c としている。

現在の Bell 検出器における ACC では屈折率 $n = 1.01 \sim 1.03$ を持つシリカエアロゲルによって Barrel 部では $0.6\text{GeV}/c < p < 3.5\text{GeV}/c$ 、Endcap 部 ($n=1.03$) では $0.5\text{GeV}/c < p < 2.0\text{GeV}/c$ の範囲の粒子識別が可能である。図 2.4 はシリカエアロゲルの屈折率に対する K 及び π の閾値運動量を示したものである。それぞれの実線の上側の領域が Cherenkov 光を放射する条件を満たしている。従って 2 つの実線の間領域では π 中間子のみ Cherenkov 光を放射する。

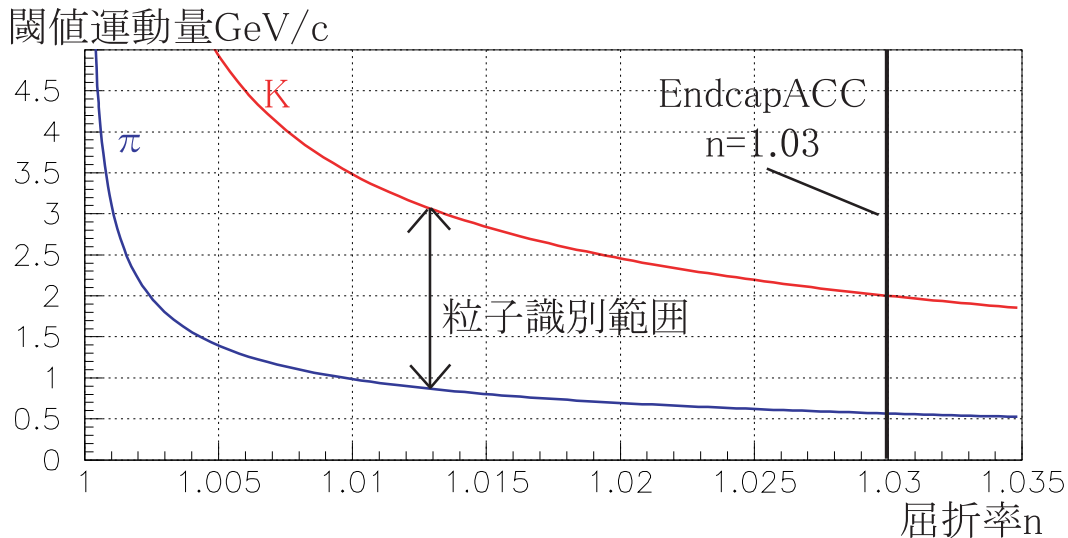


図 2.4: ACC における K/π 中間子運動量識別範囲

EndcapACC では屈折率 $n=1.03$ のシリカエアロゲルによって図中の K 、 π のそれぞれの閾値運動量の間運動量を持つ粒子が識別対象になる。実際に Endcap 部には高い運動量

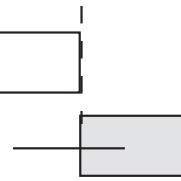
Belle検出器にお

All data (100%)

K or π / others 識別 ($\sim 90\%$)

K/ π 識別 ($\sim 80\%$)

K π 混入 ($\sim 10\%$)



第3章 A-RICH

前章で紹介したように現在の Belle 検出器の K/π 中間子識別を担う副検出器群では Belle 検出器の取得する全データ量に対して 90% が K あるいは π 中間子の識別、そのうちの 80% が K/π 中間子の識別がされ、残り 10% に K と π 中間子が混在しどちらとも識別できないデータがある。そこで私たちは現在の Belle 検出器の K/π 中間子識別能力を向上させることで 10% を 5% までに抑え、より稀な確率の事象を捉えようとしている。特に私が所属する ACC (Aerogel Cherenkov Counter) グループでは、Belle 検出器の Endcap 部における K/π 中間子識別器の観測対象粒子を、従来の観測可能運動量領域 $0.5 < p < 2.0 \text{ GeV}/c$ から $0.5 < p < \sim 4.0 \text{ GeV}/c$ へより広範囲にすることによって K/π 中間子識別の能力向上を行おうとしている。そこで私たちは新しい K/π 中間子識別器となる A-RICH (Aerogel-Ring Imaging CHerenkov) 検出器の研究開発を行っている。

3.1 EndcapACC の改善点

現在の閾値型 K/π 中間子識別検出器 ACC は屈折率 n のシリカエアロゲルを輻射体とし、荷電粒子が輻射体を通過する際、

$$\beta > \frac{1}{n} \quad (3.1)$$

の条件のときに放射される Cherenkov 光を利用している。ただし、輻射体を通過する荷電粒子の速さを v とし、 $\beta = v/c$ である。このため、輻射体の屈折率に対して Cherenkov 光放射の閾値運動量が存在し、 K/π の粒子識別ではそれぞれの閾値運動量を p_π^{th} 、 p_K^{th} とし、 $p_\pi^{th} < p < p_K^{th}$ に対して粒子識別が可能となる。従って、ACC の光検出器が Cherenkov 光を測定すれば、シリカエアロゲルを通過した粒子は π 中間子であると判断する。

この ACC での問題点は主に 2 つあげられる。Belle 検出器の Endcap に設置されているシリカエアロゲルの屈折率は $n=1.03$ である。2 章の図 2.4 に見られるように、EndcapACC で粒子識別の対象となる運動量領域は $0.5 < p < 2.0 \text{ GeV}/c$ である。Endcap 部では高い運動量を持った荷電粒子も飛来するため、現在の ACC では $p > 2.0 \text{ GeV}/c$ の運動量の粒子に対応できていない。このことが現在の検出器における問題の 1 つ目となる。Super-KEKB で要求される粒子識別能力は Belle 検出器の取得する全データ量の 95% に対して $K(\pi)$ と他ハドロンとの判別ができることである。そのために ACC では Endcap 部における高運動量領域の粒子を捉えることが重要となる。また、2 つ目の問題点として knock-on 電子による Cherenkov 光の影響がある。EndcapACC の粒子識別範囲の運動量をもつ荷電粒子であれば、シリカエアロゲルは π に対して Cherenkov 光を発生させ、 K に対しては発生させない。しかし、シリカエアロゲルを構成する原子に K が衝突し、電子 (knock-on 電子) を放出する。この knock-on 電子によって微量だがシリカエアロゲルから Cherenkov 光が放出される。そのため、実際には π でないときにも光検出器は応答を示してしまう。

3.2 A-RICH 検出器

そこで、ACC でのこれらの問題点を解決するために新しい識別装置の研究開発が行われている。この新識別装置を A-RICH 検出器という。A-RICH 検出器は、輻射体と Cherenkov 光を測定する光検出器から成る。K/π 粒子識別は Cherenkov 光放射条件、式 3.1 を満たす荷電粒子が輻射体を通過する際に放射される Cherenkov 光から荷電粒子の速さを導出し、この速さと既知の荷電粒子運動量とによって粒子質量を求めることで行う。

Cherenkov 光を利用するためには輻射体が不可欠である。そこで参考までに輻射体の一例を表 3.1 にまとめた。

物質		屈折率 n
固体	ガラス	1.47
	ポリエチレン	1.58
	シリカエアロゲル	1.006 ~ 1.06
液体	水	1.33
	液体水素	1.112
	液体ヘリウム	1.024
気体	二酸化炭素	1.000450
	イソブタン	1.001900
	空気	1.000292

表 3.1: 輻射体の種類とそれぞれの屈折率

A-RICH 検出器では、屈折率を制御することの出来るシリカエアロゲルを輻射体として採用する。

A-RICH 検出器の粒子識別方法の特徴は、Cherenkov 光の放射角度を幾何学的に求めることにある。Cherenkov 光は荷電粒子が速さ v で誘電体中を進む時に、荷電粒子がつくる電場によって荷電粒子行路付近の媒質が分極することによって発生する。輻射体中を Cherenkov 光発生条件を満たす速度で荷電粒子が通過すると、その行路各点で放射された光子の波面は Huygens の原理から直線状に並ぶ (図 3.1 参照) [3]。

このため、荷電粒子の速さ β と Cherenkov 光の放射角度 θ_C との関係が

$$\cos \theta_C = \frac{c \Delta t}{v \Delta t} = \frac{1}{n\beta} \quad (3.2)$$

で与えられる。ゆえに荷電粒子を既知の運動量をもとに判別するためにはこの Cherenkov 光放射角を求める必要がある。

A-RICH 検出器では輻射体と光検出器との距離を固定し、位置分解能の備わった光検出器でこの Cherenkov 光を測定するため、検出器から得られる Cherenkov 光の位置情報から Cherenkov 角 θ_C を導出することができる。高屈折率の結晶などを輻射体として用いた場合、放射された Cherenkov 光が結晶表面で全反射をおこし、外に出てこない事が考えられる。そのため、低屈折率の輻射体を用いることで、広範囲の運動量領域の粒子を観測対象とする。且つ θ_C を Cherenkov 光 1 つ 1 つから求めるため、knock-on 電子に左右されにくい。

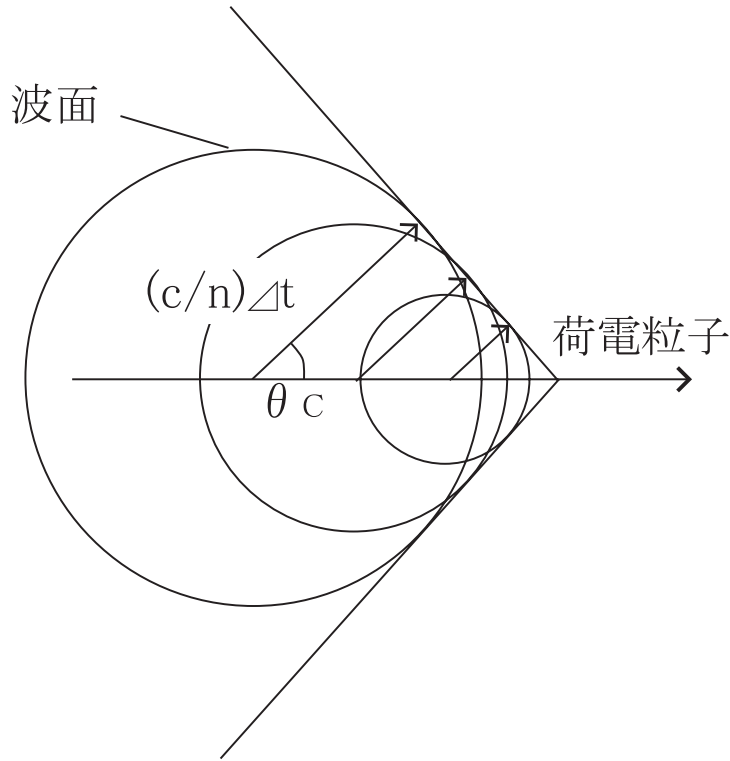


図 3.1: 荷電粒子速度 β と Cherenkov 角 θ の関係

一般に、荷電粒子が輻射体中を L だけ進んだときの放出される光子数 N は波長 $d\lambda$ あたり

$$\frac{dN}{d\lambda} = \frac{2\pi\alpha z^2}{\lambda^2} L \sin^2 \theta_C \quad (3.3)$$

として与えられる。ただし、ここで α は微細構造定数、 z は荷電粒子の電荷数である。A-RICH 検出器の光検出器で同時に測定する光子数は ~ 50 個程度、光電子数は 10 個程度である。またこの時の光子は単一波長だが短波長は Rayleigh 散乱によって散乱され検出されず、光検出器で測定される波長のピークはおよそ 400nm となっている。

このように A-RICH 検出器は Cherenkov 効果を利用した新しい K/π 粒子識別検出器である。この RICH 検出器の K/π 中間子識別性能を表す標準偏差 N_σ は、 $N_{p.e.}$ を検出光電子数、 σ_C を Cherenkov 角の測定精度とし、

$$N_\sigma = \frac{\theta_K - \theta_\pi}{\sigma_C} \sqrt{N_{p.e.}} \quad (3.4)$$

θ_K : K 中間子の Cherenkov 角
 θ_π : π 中間子の Cherenkov 角

によって定義する。

一般に、RICH 検出器はこの Cherenkov 光を観測するための形状から proximity focusing 型、mirror focusing 型に分けられている (図 3.2 参照)。Belle 検出器の Endcap 部における設置空間の制約を考慮し、A-RICH 検出器では proximity focusing 型を採用することにした。

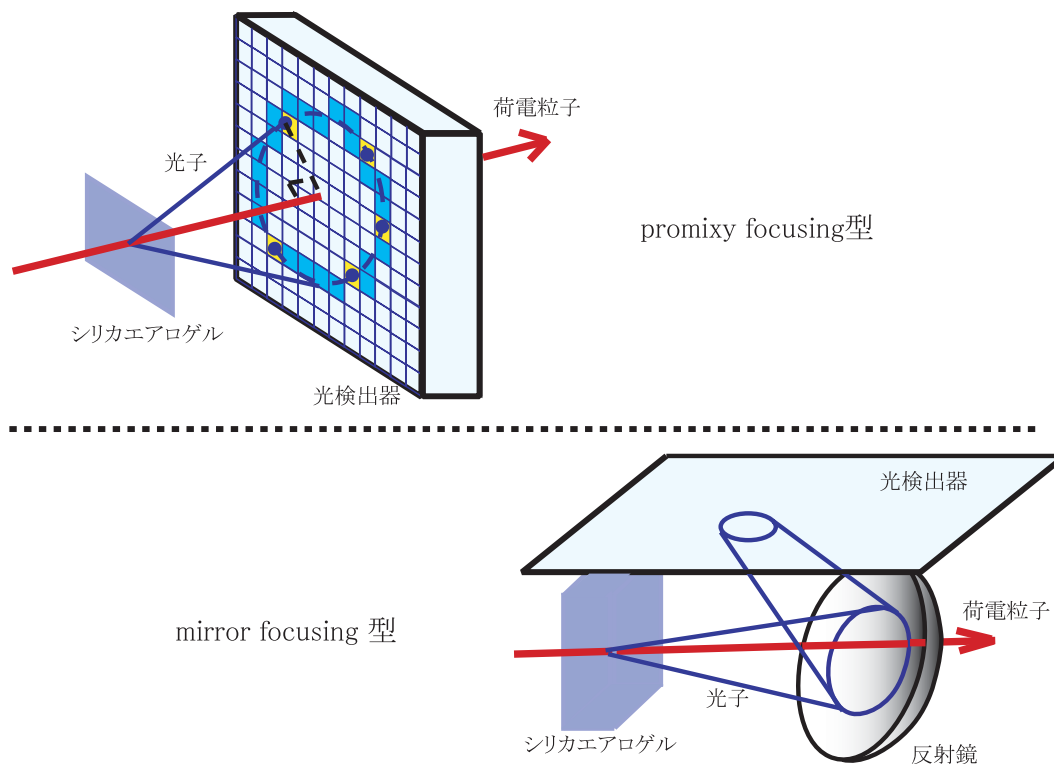


図 3.2: RICH 検出器の種類

3.2.1 シリカエアロゲル

シリカエアロゲルは体積の 90% 以上を空隙が占める透明な発泡スチロール状の外観を持つ固体物質である。図 3.3 は実際のシリカエアロゲルの外観の写真と構造を示したものである。(a) ではシリカエアロゲルを通して、その奥に置かれた乾電池を確認することができる。このように、シリカエアロゲルは粒子径が光の波長より充分小さく、光の透過性に優れているという特徴を持つ。その構造は、 SiO_2 を主成分とし、直径数 nm の 1 次粒子 (SiO_2)_n が樹枝状に凝集して数十 nm の 2 次粒子を形成している。更にこの 2 次粒子が集まり図 3.3(b) に見られるような形状となって 3 次元構造を成している。

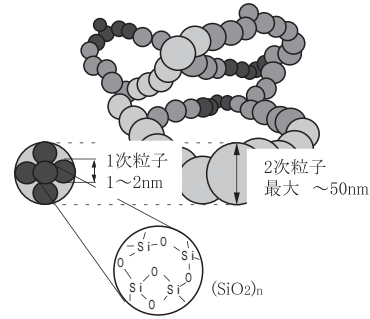
シリカエアロゲルは塩基を触媒としたゾル・ゲル法でシリカの湿潤ゲルを作り、このゲルをアルコールなどの超臨界条件の下で、徐々に溶媒を抜いて乾燥（超臨界乾燥）させる。このゾルゲル法のアルコキシドと溶媒の混合比を調節することでシリカエアロゲルの密度を決定する。その結果、屈折率を 1.006 ~ 1.060 の間で制御することが可能である。また透過長は、(SiO_2)_n が構成する粒子径に依存し、これはゲル化するまでの時間に依存している。

A-RICH 用輻射体としての要請

このシリカエアロゲルが A-RICH 検出器の輻射体としての性能を十分に発揮することが要求される。輻射体は、低屈折率で厚さが薄く、且つ光量が充分であることである。低屈折率である必要性は次の通りである。図 3.4 は運動量 $2.0\text{GeV}/c$ の K/π が輻射体を通過し



(a) シリカエアロゲル(写真)



(b) シリカエアロゲル構造

図 3.3: シリカエアロゲル：写真とゲル構造

たときに放出される Cherenkov 放射角の理想値を輻射体の屈折率に対して表示したものである。図は理想値ではあるが K/π のラインが縦に離れているほど A-RICH 検出器としての分解能は高いことになる。低屈折率であると同じ運動量を持つ K/π 粒子識別における Cherenkov 光放射角度の差、 $\theta_K - \theta_\pi$ 、が大きくなり分解能をあげるために必要である。

また、Cherenkov 放射角 θ_C は式 3.2 の関係から屈折率の増大に伴い、 θ_C も増大する。そのため仮に高屈折率であると、光検出器の有効面積を広域にしなければならない、或いは全反射で光が輻射体から出て来られなくなるためである。輻射体としてのシリカエアロゲルの厚みであるが、光量を稼ぐために安易に厚くすると Cherenkov 光の放射点の不特定性から分解能が下がってしまう。そのため検出光量を損なわない程度の薄さが要求される。RICH 検出器用輻射体としてのシリカエアロゲルにはこれらの条件下でその屈折率と厚みを調整しなければならない。

3.2.2 光検出器

A-RICH 検出器は Cherenkov 光 1 つ 1 つの検出器上の位置情報から、Cherenkov 光放射角度を再構成することで、シリカエアロゲルを通過した荷電粒子の速さを求めるという特徴を持っている。そのため、A-RICH 用の光検出器には、十分な有効面積且つ位置分解能が不可欠である。また、荷電粒子の運動量 p を測定するために、Belle 検出器全体に 1.5T の磁場 B がかけられており、運動量は曲率を ρ としたとき

$$p[\text{GeV}/c] = 0.3\rho[\text{m}]B[\text{T}] \quad (3.5)$$

と表される。A-RICH 検出器の粒子識別は、この運動量 p を既知とし、導出した荷電粒子の速さと合わせて粒子質量を求めることによって行われている。そのため、1.5T の磁場中で光検出器は動かなければならず、且つこの磁場中で 1 光電子の応答を得られなければならない。

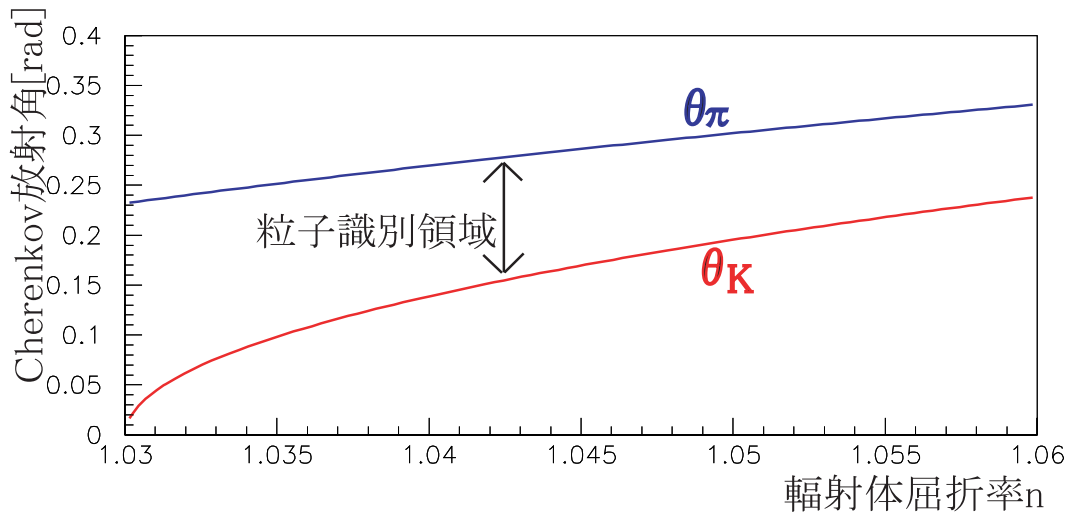


図 3.4: 荷電粒子運動量 2.0GeV のときの輻射体屈折率と Cherenkov 角の関係性

更に Super-KEKB では現在の Belle 検出器の支持構造体をそのまま利用し、副検出器の能力向上をすることによって稀確率の事象観測する予定である。副検出器のうち ACC グループでは現在の Endcap 部分に A-RICH 検出器を導入する予定である。したがって A-RICH 検出器には設置空間の制約が生じる。Belle 検出器 Endcap 部の A-RICH 検出器利用空間は奥行きにして 30cm 程度である。そのため、シグナルの読み出し回路を含めた光検出器のサイズにも規制が生じる。

これらの A-RICH 検出器の輻射体、光検出器に対する要求を表 3.2 にまとめた。

A-RICH 検出器 (promixity focusing 型)	
輻射体	シリカエアロゲル 低屈折率且つ検出光量を損なわない程度の薄さ
光検出器	新型マルチアノード光検出器 大有効面積 (80%) 位置分解能 (数 mm) 磁場 (1.5T) 中での稼動 磁場中での 1 光電子応答 読み出し回路を含めた光検出器サイズ (A-RICH 検出器設置空間は 30cm 以下)

表 3.2: Super-KEKB に向けた RICH 検出器への要請

現在 ACC グループではこれらの条件を満たす光検出器を開発すべく浜松ホトニクス株式会社と共に新型マルチアノード光検出器 (第 5 章 HAPD 参照) の共同開発を行っている。

第4章 Beam Test

Super-KEKB へ向け現在の Belle 検出器の副検出器群のそれぞれの能力を向上させるため各検出器グループは研究開発を行っている。その中の ACC グループでは Belle 検出器 Endcap 部に導入予定されている A-RICH 検出器の研究開発に取り組んでいる。前章ではこの A-RICH 検出器について K/π 中間子を識別する原理と光検出器の要求について述べた。この A-RICH 検出器に採用する新型マルチアノード型光検出器 HAPD の性能評価する前に、HAPD を A-RICH 用の光検出器として機能するかどうかを判断するために考案したシステム、Compact RICH 検出器の稼働を確認する必要がある。そのため、本章ではテストビームを用いてこの Compact RICH 検出器の評価を行う。

4.1 Compact RICH 検出器

Compact RICH 検出器は、A-RICH 検出器の光検出器 HAPD を評価するために考案した、有効面積の小さな光検出器で構成されたコンパクトな RICH 検出器である。A-RICH 用光検出器として導入予定されている新型マルチアノード光検出器 HAPD (第5章 HAPD 参照) は私たち ACC グループと浜松ホトニクス株式会社の共同開発であり、現在浜松ホトニクスで試作段階である。HAPD の試作器が完成された時に、HAPD 1 台 (144 channel、有効範囲 $64 \times 64 \text{mm}^2$) という条件下で A-RICH 検出器としての性能を評価できるようにするため、Cherenkov 光をこの小さな有効面積内に集光させる必要がある。Compact RICH 検出器はそのためのシステムである。

Compact RICH 検出器は輻射体と光検出器の間に凸レンズを配置している。このシステム中でレンズの必要性は表 4.1 にあげた問題点のためである。表は、有効面積の小さな光検出器を A-RICH 用の光検出器として用いた場合に、A-RICH 検出器によって再構成された Cherenkov 放射角度 θ_C の角度分解能 σ_θ に生じる問題点を示している。

問題点	角度分解能 σ_θ への影響
輻射体と光検出器の距離 d	d が小さくなるほど Cherenkov リング半径は小さくなり、 σ_θ は大きくなる。
Cherenkov 光放射点の不特定性	輻射体の厚み ℓ に対して最大 $\ell \tan \theta_C$ のリング幅

表 4.1: 有効面積の小さい光検出器で A-RICH 検出器を構成したときの Cherenkov 光放射角度の分解能に寄与すると考えられる問題点

この2つの原因が再構成する角度分解能へ寄与していると考えられる。これらの影響を小さくするために Compact RICH 検出器では凸レンズを導入することにした。図 4.1 はこの Compact RICH 検出器の概念図を表している。

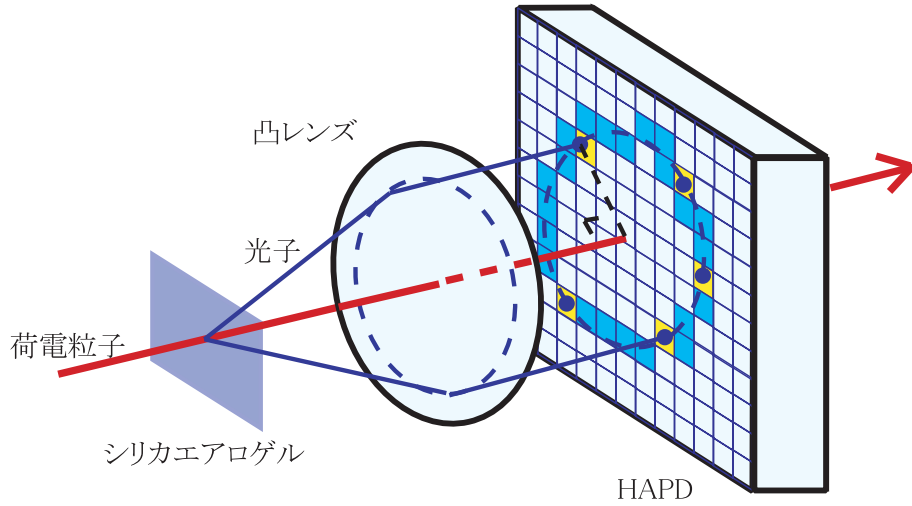


図 4.1: 凸レンズを Cherenkov 光の集光として用いた Compact RICH 検出器概念図

4.1.1 シミュレーション

A-RICH 検出器及び Compact RICH 検出器を評価するにあたり、シミュレーションを行った。両者のシミュレーションでは乱数によって実験のビーム上流と下流にあたる位置を振り、そのベクトルを荷電粒子とみなす。輻射体の厚み ℓ を 20mm とし、輻射体中を通った荷電粒子の軌跡から Cherenkov 光をベクトルとし、乱数によって発生させている。このシミュレーション上の光検出器はフラットパネル型光検出器（浜松ホトニクス、H8500）を想定し、各ピクセルの 1 辺の大きさは 5.6mm としている。光子ベクトルは「シリカエアロゲル」、「空気（空気、レンズ、空気）」、「光検出器の入射窓」といったそれぞれの屈折率をもつ媒質に対して snell の法則を適用してその方向を変えている。光検出器は入射窓を通過した Cherenkov 光のうち pixel に入ったものだけを選び、このときの pixel の中心の値を検出器からの位置情報として返す。また、Cherenkov 光放射角度を再構成する時に必要な情報はこの pixel の中心値と Cherenkov 光の放射位置である。Cherenkov 光の放射位置は輻射体中を荷電粒子が通る軌跡の中心と定義した。図 4.2 はこのシミュレーションでの Cherenkov 角の再構成方法を示した図である。ビームベクトルから Cherenkov 光の放射位置 $(x_0, y_0, \ell/2)$ とリングの中心値 $(x_c, y_c, d + w)$ を決定し、光検出器から光子が入射した pixel の中心値 $(x_i, y_i, d + w)$ を決定する。この 3 つの位置情報から距離 D とリング半径 R を導出し、Cherenkov 角を再構成する。

従って、Cherenkov 光放射角度 θ_C は

$$\begin{aligned} \theta_C &= \arctan \left(\frac{R}{D} \right), \\ R &= \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2} \\ D &= \sqrt{(x_c - x_0)^2 + (y_c - y_0)^2 + (d + w - \ell/2)^2} \end{aligned} \quad (4.1)$$

として与えられる。

Compact RICH 検出器でのシミュレーション方法も A-RICH 検出器と同様に行った。Compact RICH 検出器に用いる輻射体の選抜に必要な要素は屈折率である。輻射体からの

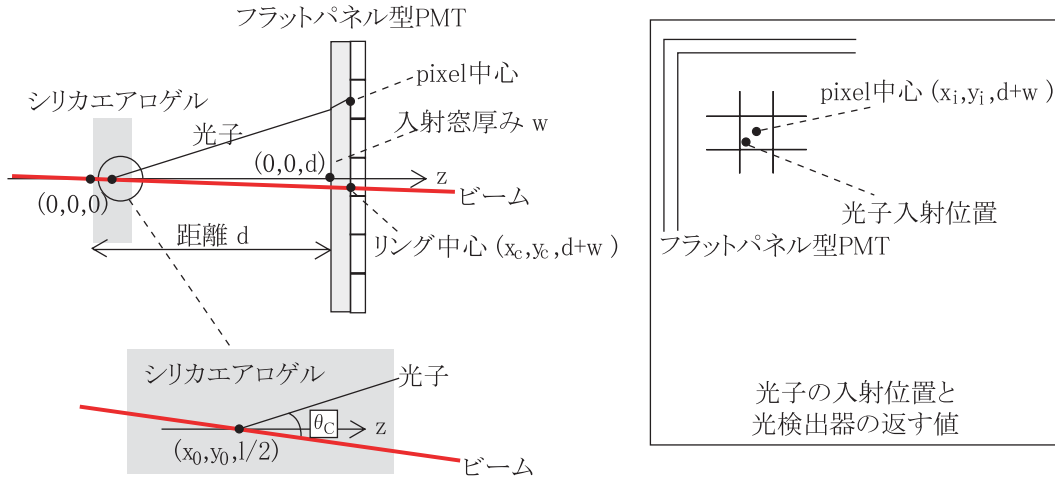


図 4.2: Cherenkov 角の再構成方法

Cherenkov 光を光検出器上で集光させるためには放射体とレンズの距離をレンズの焦点距離 f に合わせる必要がある。レンズの表面上での Cherenkov リングの直径 D_C は $2f \tan \theta_C$ として求めることができる。ただし θ_C は Cherenkov 光の放射角度である。レンズの直径を D とすれば、Cherenkov 光を集光させるための条件は

$$D > D_C$$

$$\therefore D > 2f \tan \left(\cos^{-1} \left(\frac{1}{n\beta} \right) \right) \quad (4.2)$$

となる。ここで、荷電粒子の速度を β 、放射体の屈折率を n としている。図 4.3 は荷電粒子

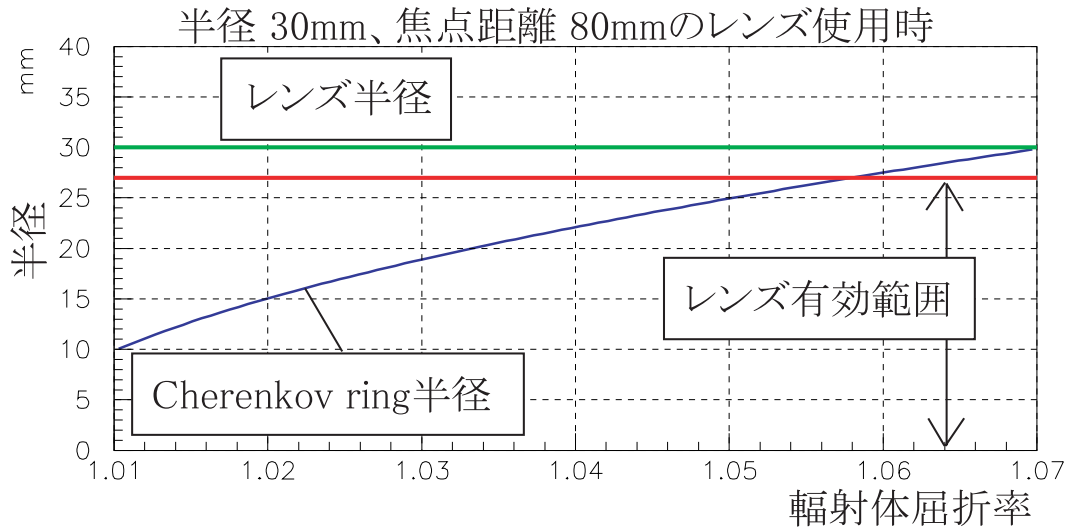


図 4.3: Compact RICH 検出器におけるレンズ表面での Cherenkov リング半径の理想値の輻射体屈折率による変動

を運動量 $2.0 \text{ GeV}/c$ の π^- 、放射体とレンズの距離を焦点距離 f に固定したときに式 4.2 に

よる輻射体の屈折率とレンズ表面上の Cherenkov リング半径の関係をに示したグラフである。図 4.3 と Cherenkov 光の放射点の不特定性による効果を考慮し、Compact RICH 検出器に使用するシリカエアロゲルはおよそ 1.03 の屈折率をもつものがよいと決定した。そこで実験に用いるシリカエアロゲルのなかから屈折率 1.02693 のシリカエアロゲル (ID:NP-1) を選択した。表 4.2 にはこのシリカエアロゲル NP-1 の規格をまとめたものである。ここでシリカエアロゲルの透過長 (Transmission length) Λ を

$$T = T_0 \exp\left(-\frac{\ell}{\Lambda}\right)$$

(4.3)

T : 透過光の強度
 T_0 : 入射光の強度
 ℓ : シリカエアロゲルの厚さ

によって定義する。

Parameter		Discription/Value	Unit
ID: NP-1	Index	1.02693	-
	Transmission length($\lambda = 400nm$)	33.64	mm
	Demesional outline (W×H×D)	110×110×20	mm

表 4.2: Compact RICH 検出器に用いたシリカエアロゲル (NP-1) の規格

このシリカエアロゲルの規格の値を Compact RICH 検出器シミュレーションに導入し、Compact RICH 検出器に採用した凸レンズ (シグマ光機株式会社) の規格の値もシミュレーションのパラメータとして導入した。表 4.3 には Compact RICH 検出器に使用した凸レン

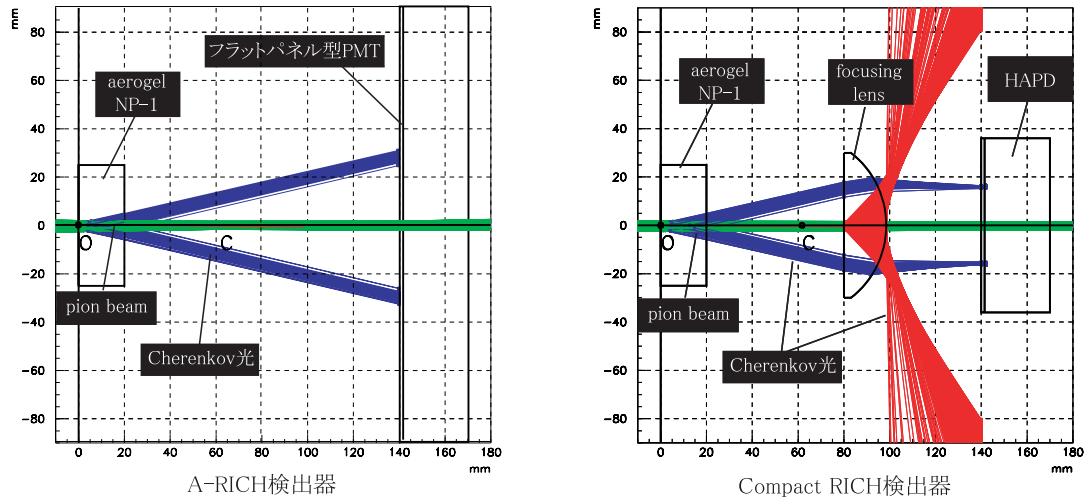


図 4.4: A-RICH 検出器及び Compact RICH 検出器のシミュレーション

体を通ることになる。しかし、Snell の法則から高屈折率の媒質から低屈折率の媒質へ光子が入射する場合、媒質の境界面ベクトルと光子の進行方向ベクトルのなす角度は大きくなる。そのためレンズを輻射体とした Cherenkov 光は有効面積の小さな光検出器に対しては観測されずに済むということも判った。

ここで再び有効面積の大きさが 64mm の HAPD で Cherenkov リングを観測しようとするときの問題点に戻る。輻射体と光検出器の距離を近づけることが考えられる。図 4.5 は輻射体の距離を変えたときの角度分解能 σ_θ への寄与に関する A-RICH 検出器シミュレーション結果を表したものである。図 4.5 によると輻射体と光検出器の距離を近づけるほど角度分解能への寄与が大きくなっていることが分かる。更に、Cherenkov 角の分解能への

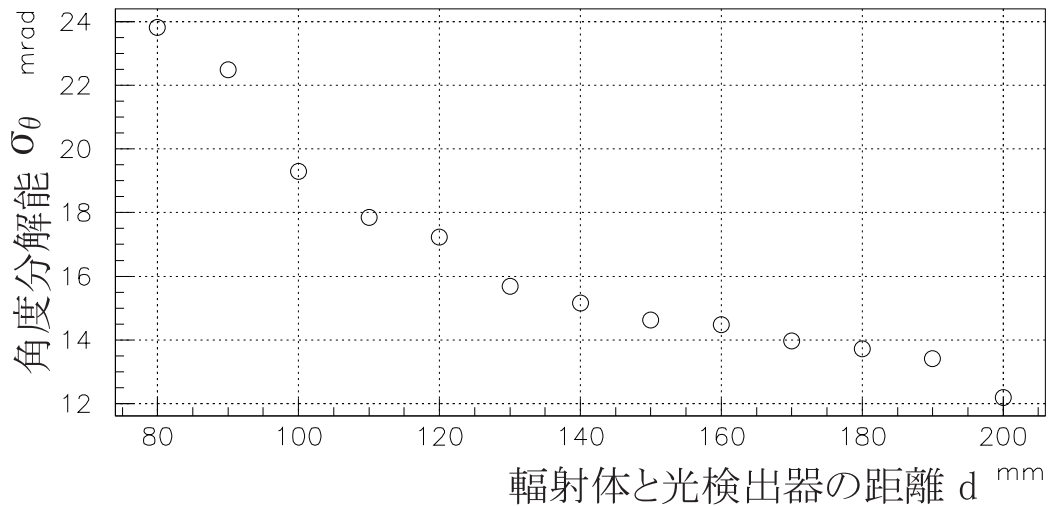


図 4.5: シミュレーションによる輻射体 - 光検出器間距離の Cherenkov 角の分解能 σ_θ への寄与

寄与は Cherenkov 光の放射点の不特定性もある。Cherenkov 光は輻射体中のどの位置から発生しているかを正確に特定することは難しい。

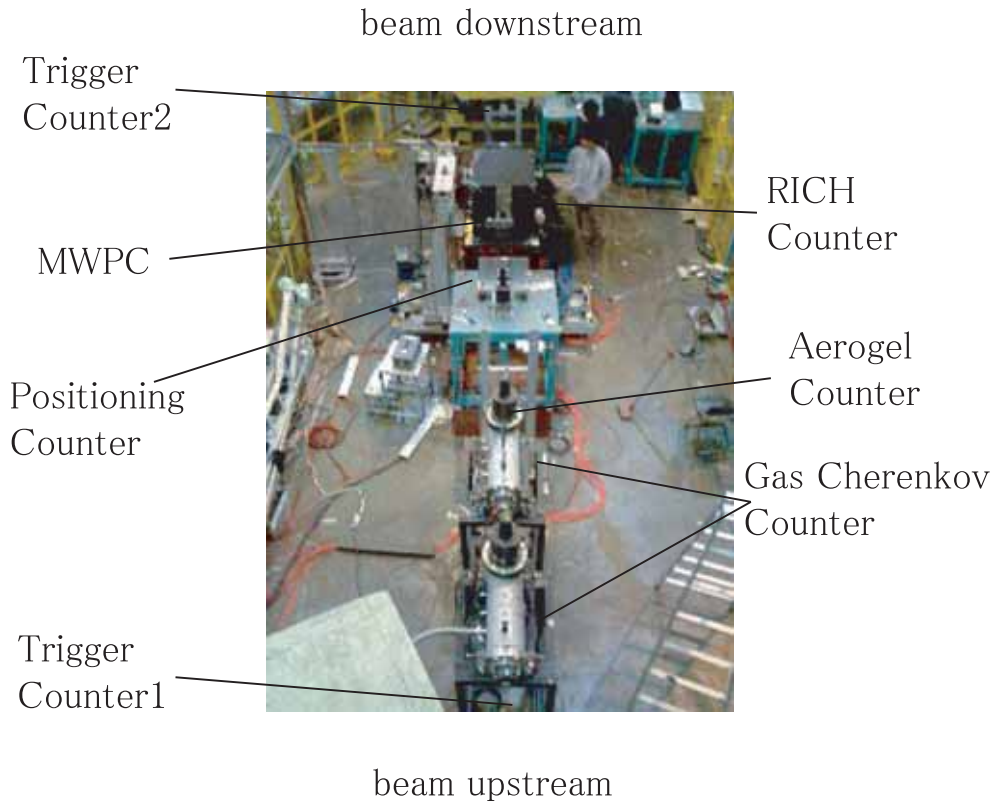


図 4.6: Beam Test 実験のセットアップ (写真)

この2点から Cherenkov 光を集光する目的で凸レンズを導入し、シリカエアロゲル、凸レンズ、光検出器を組み合わせ、Compact RICH 検出器とした。

4.2 測定

この Compact RICH 検出器の稼働を確かめるためにテストビーム用いて実験を行った。実験は高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の陽子シンクロトロンにある T1 ビームエリアにて行い、 K/π 中間子識別の目的にあわせ、荷電粒子 π^- を実際に使用した。シリカエアロゲルは NP-1 を、光検出器は、フラットパネル型マルチアノード光検出器 (浜松ホトニクス、H8500) を用いて RICH 検出器を構成した。

4.2.1 実験準備

図 4.6 は実際の Beam Test 実験のセットアップである。

図の下方から上方へビームが通過する。ビーム中には π 中間子以外にも電子が含まれているので π^- 中間子のみを選択するため電子を識別する閾値型の Cherenkov Counter が用意されている。まず標準光電子増倍管の先端にプラスチックシンチレータを設けた Trigger Counter をビームの最上流と最下流に設置し、2点間のよるビームラインが決定される。ビームライン上流側に設置された2つの Gas(CO_2) Cherenkov Counter によってビームが

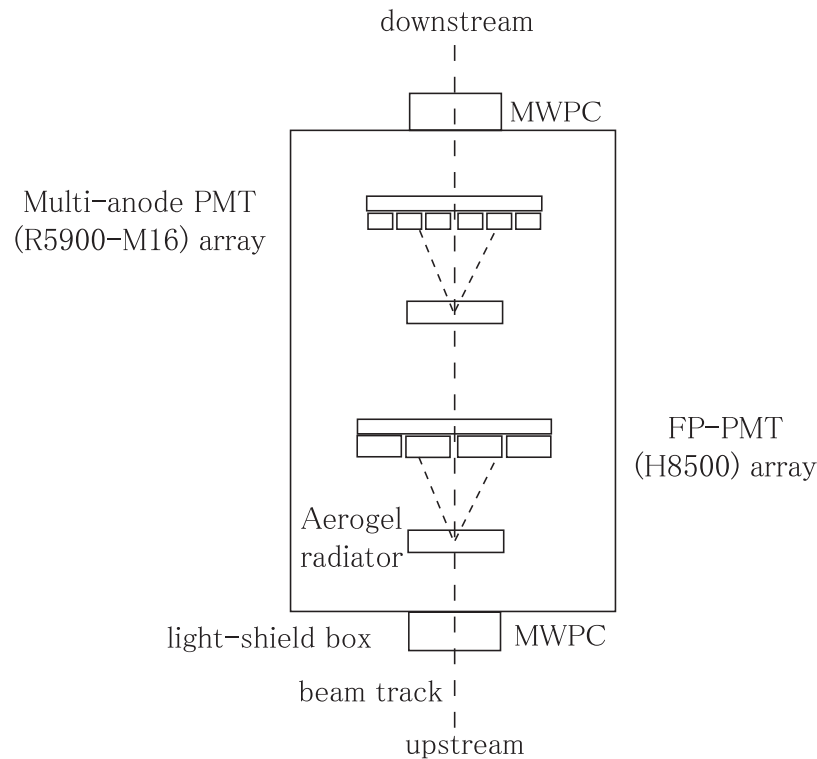


図 4.7: RICH 検出器のセットアップ

ら e^- を取り除く。その下流に置かれた 1 台の Aerogel Counter によって正電荷のビームを使った場合に高運動量領域における p と低運動量領域における μ を取り除く。さらにその下流に幅およそ 10mm のシンチレータを十字に交差させた Positioning Counter を設置し、選択するビームを絞っている。

これらの検出器によって選択された π^- ビームは、RICH 検出器の置かれたアルミ製暗箱の上流、下流側の両方に設けられた MWPC (Multi-Wire Proportional Chambers) によってその軌跡が決定される。この MWPC には Ar と CH_4 が 9 : 1 の割合で混入されており、直径 $20\mu m$ 金メッキタングステン製のワイヤが 2mm の間隔で x 、 y 方向に張り巡らされている。 π^- ビームの軌跡は MWPC によってその軌跡が決定され、 π^- を RICH 検出器に利用される。(表 4.4 参照)

検出器	役割
Trigger Couter	ビームの軌跡情報取得、ビーム最上流と最下流に設置
Gas Cherenkov Counter	e^- を排除
Aerogel Counter	高運動量領域の p 、低運動量領域の μ を排除
Positioning Couter	ビームの軌跡情報取得
MWPC	RICH 検出器に使用する π^- の正確な軌跡情報取得

表 4.4: 実験セットアップに用いた検出器群

図 4.7 は暗箱内の A-RICH 検出器の配置の様子を表している。私たちはビーム上流と下

流の RICH 検出器を便宜上 RICH1、RICH2 と呼称している。RICH1 の光検出器はフラットパネル型 PMT (浜松ホトニクス、H8500) 16 台を 4×4 行列状になるように配置したもので構成されている。A-RICH 検出器に使った光検出器 H8500 の特徴を表 4.5 に載せた。

Parameter		Description/Value	Unit
Spectral response (peak)		300-650 (420)	nm
Photocathode material		bialkali	-
Input window	Material	borosilicate glass	-
	Thickness	1.5	mm
Number of anode pixels		64(8 × 8matrix)	-
Pixels size / Pitch at Center		5.8 × 5.8 6.08	mm
Effective area		49 × 49	mm
Dimensional outline(W×H×D)		52×52×28	mm
Maximum supply voltage		-1100	V

表 4.5: FP-PMT(H8500) の規格 (参考資料: 浜松ホトニクス)

図 4.8、4.9 はそれぞれ A-RICH 検出器、Compact RICH 検出器のセットアップの様子である。図 4.9 に見られるように Compact RICH では中心 $64 \times 64 \text{mm}^2$ 以外を遮光したフラットパネル型光検出器を用いた。

Compact RICH 検出器の性能評価を行うために行った測定は以下の 3 つの項目である。ここで「距離」とは輻射体の上流側側面から光検出器の入射窓の表面までの距離のことをさしている。

1. 輻射体: シリカエアロゲル NP-1、距離: 200mm、レンズなし (A-RICH 検出器)
2. 輻射体: NP-1、距離: 140mm、レンズなし (A-RICH 検出器)
3. 輻射体: NP-1、距離: 140mm、レンズ使用 (Compact RICH 検出器)

1. は RICH 検出器で輻射体としてシリカエアロゲル NP-1 を使用したときの Cherenkov 角を基準とするためである。Compact RICH 検出器から算出される角度との比較によって Compact RICH 検出器を評価する。2. は Compact RICH 検出器における集光用レンズの効果を確かめるためである。また、1. と比較することによって距離の Cherenkov 角への寄与を見るためでもある。3. は実際の Compact RICH 検出器の評価である。

4.2.2 結果

図 4.10 は A-RICH 検出器で測定された Cherenkov 光の光検出器上の分布を表している。単一の π^- 中間子がシリカエアロゲル輻射体を通過したときに放射される Cherenkov 光を光検出器が同時に測定した場合光子分布は図に示すようになる。図 4.10 は測定項目の 1. のセットアップに該当する。各図の中央に分布されている光子は π^- が光検出器の入射窓を輻射体としたときに発生する Cherenkov 光である。

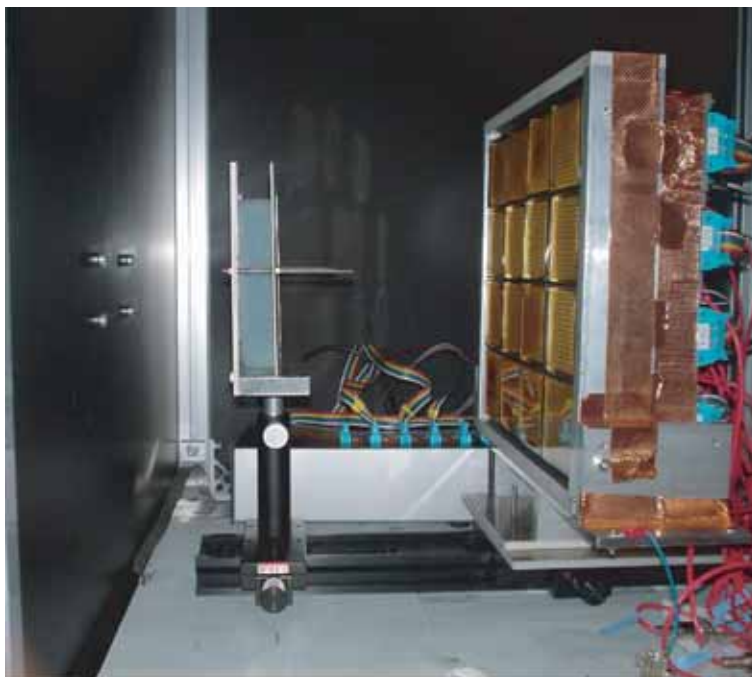


図 4.8: A-RICH 検出器 (写真) : シリカエアロゲルとマルチアノード光検出器 FP-PMT (浜松ホトニクス、H8500 4×4 array)

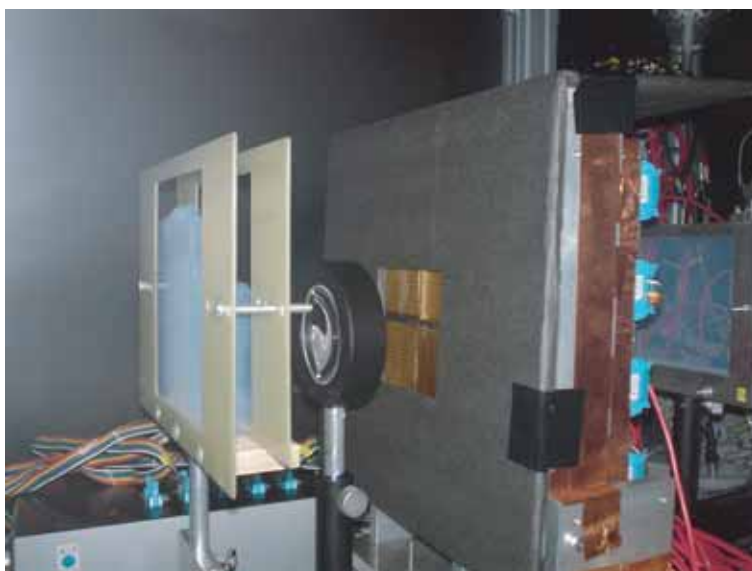


図 4.9: Compact RICH 検出器 (写真) : シリカエアロゲル、レンズ、1 辺 74mm の穴を開けた遮光付 FP-PMT

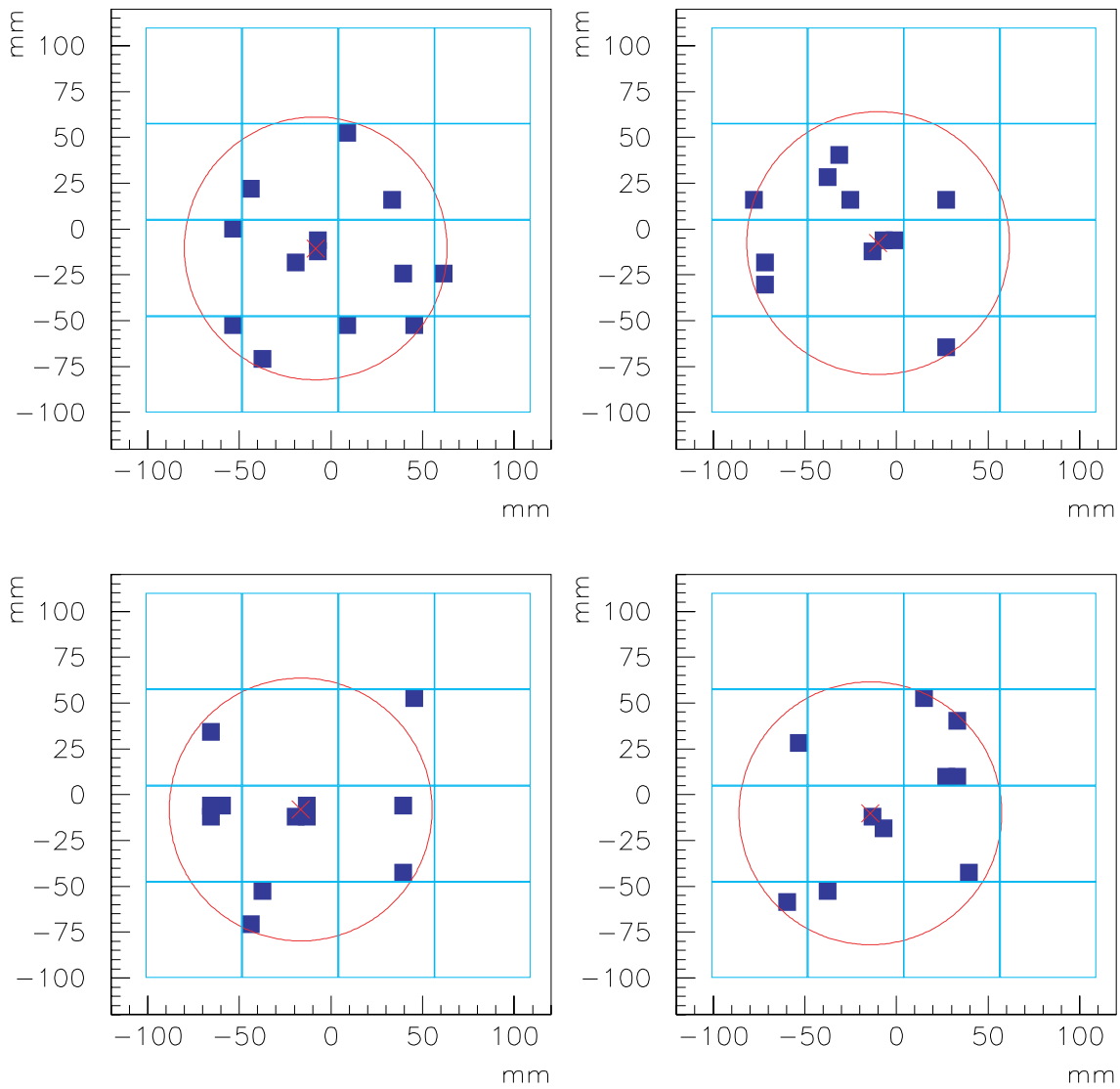


図 4.10: π^- ビーム 1 track あたりに発生する Cherenkov 光の光検出器上の分布

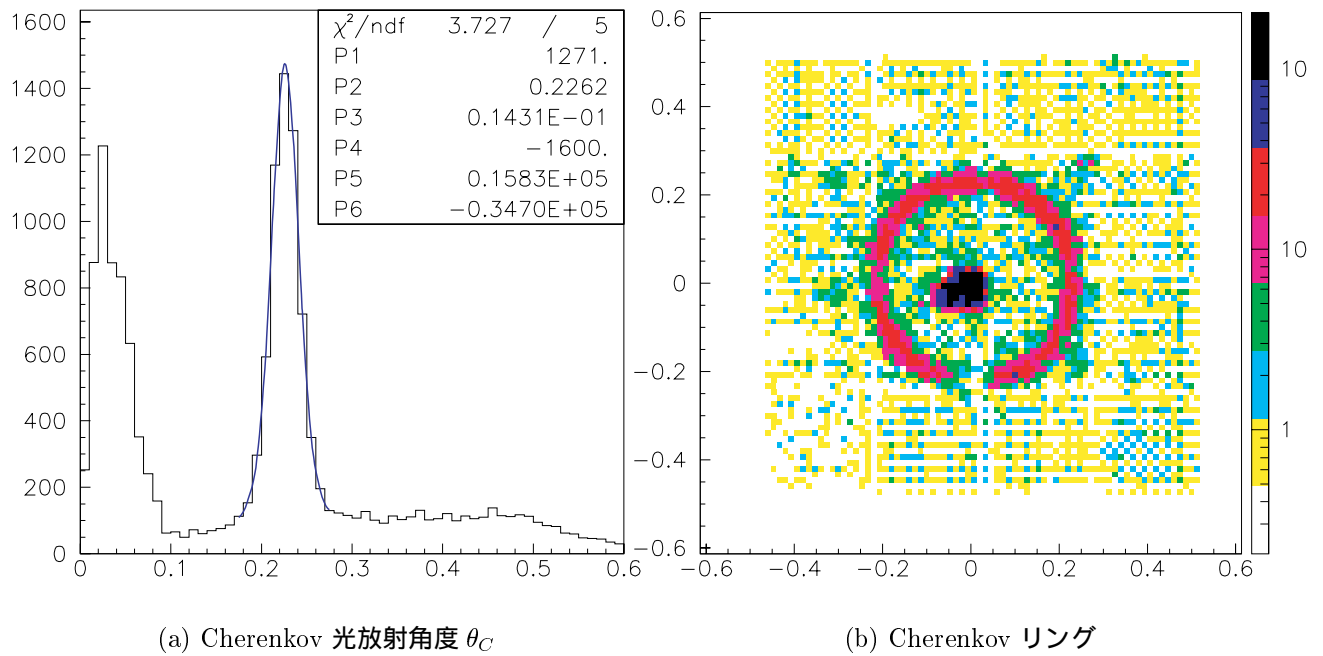


図 4.11: 測定項目 1. の結果： π^- 運動量 $2.0\text{GeV}/c$ 、輻射体 - 光検出器間距離を 200mm に設定したときの Cherenkov 角の再構成、及び Cherenkov リング

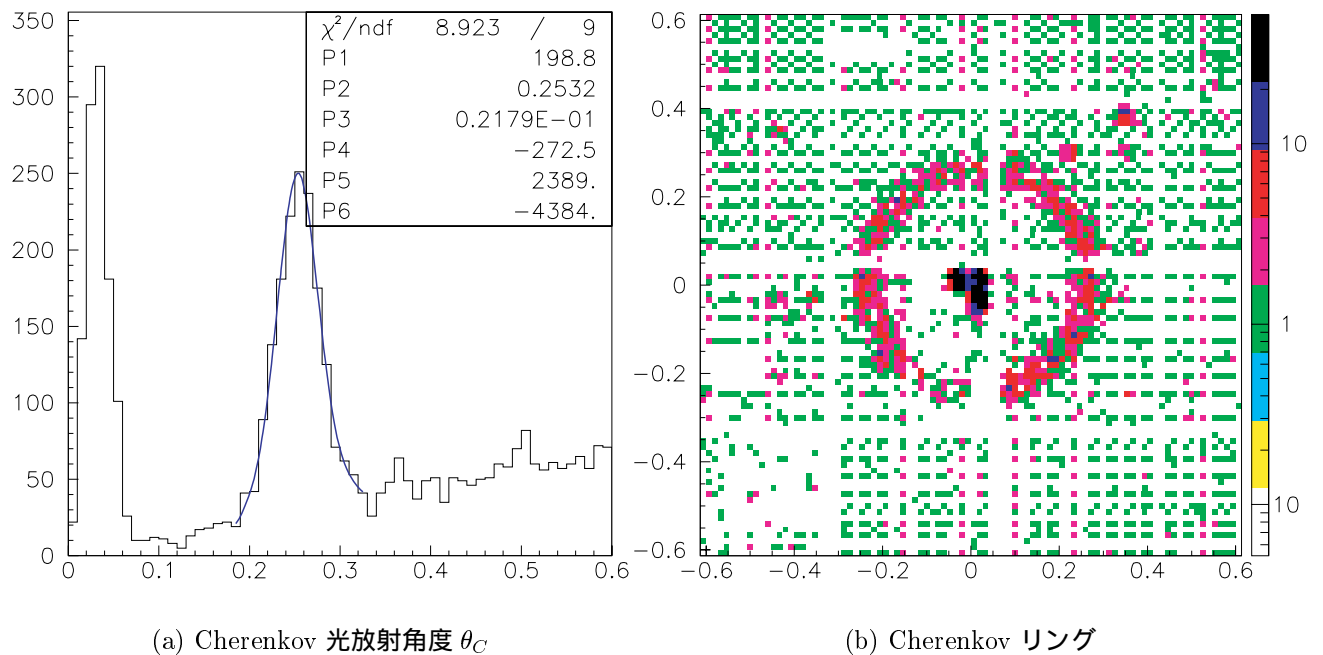


図 4.12: 測定項目 2. の結果： π^- 運動量 $2.0\text{GeV}/c$ 、輻射体 - 光検出器間距離を 140mm に設定したときの Cherenkov 角の再構成、及び Cherenkov リング

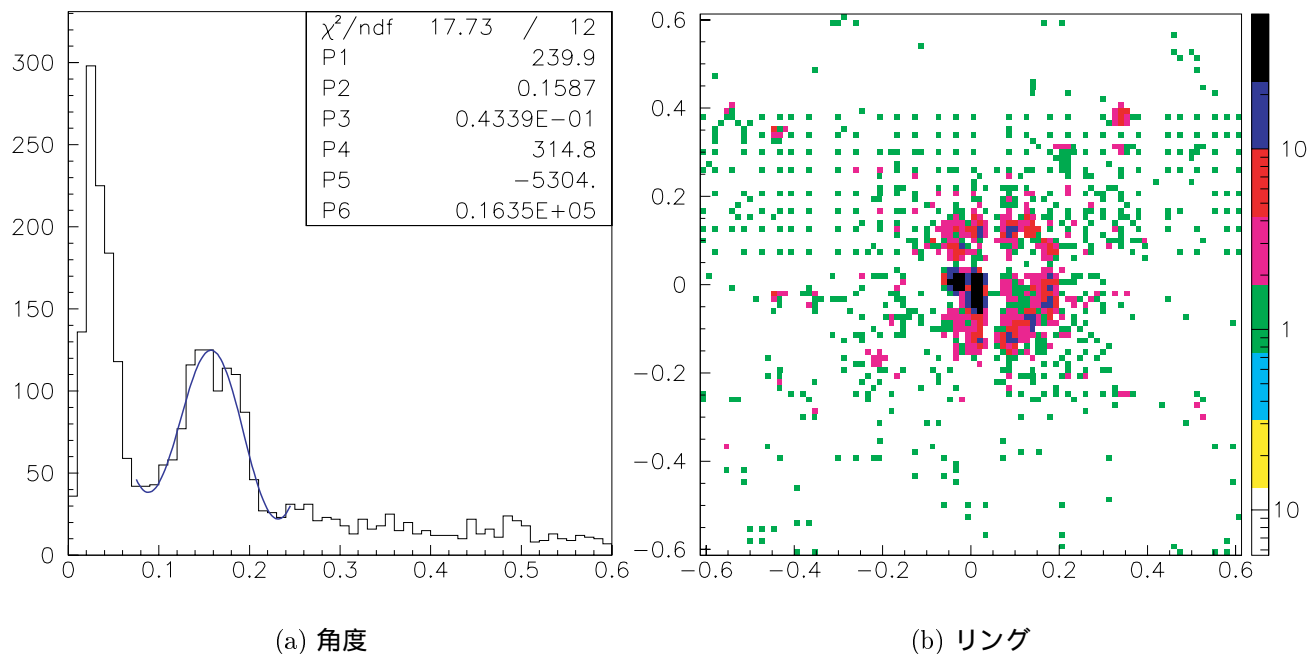


図 4.13: 測定項目 3. の結果 : Compact RICH 検出器を使用した結果、 π^- 運動量 $2.0\text{GeV}/c$ 、輻射体 - 光検出器間距離を 140mm に設定したときの角度の再構成、及びリング

測定項目の結果を図 4.11 から 4.13 に示した。

これらの図は、光検出器に到達した Cherenkov 光の位置情報より放射角度を再構成したときの角度分布を 1 次元、2 次元によって表示したものである。また、表 4.6 にそのときの Cherenkov 角の情報を示した。この角度情報は Cherenkov 角度分布を Gaussian と 2 次関数によって fit したときの値である。

測定項目	輻射体 - 光検出器間距離 [mm]	Cherenkov 角度情報		光学素子の有無
		mean [rad]	sigma [mrad]	
1.	200	0.2262	14.31	-
2.	140	0.2532	21.79	-
3.	140	0.1587	43.49	使用

表 4.6: 各測定項目における Cherenkov 角度情報

4.2.3 考察

実験結果と比較を行うために、A-RICH 検出器、Compact RICH 検出器のシミュレーションを行った。実験とシミュレーションの相関関係は表 4.7 である。このシミュレーションでは実験のセットアップと同位置になるように各検出器を配置した。ここでの座標軸はビーム上流側から下流側へと向かったベクトルを z 軸とし、 z 軸からの傾きを θ とする。

このシミュレーション結果は表 4.8 である。

検出器 項目	役割	
	実験、解析	シミュレーション
MWPC	π^- 中間子の軌跡情報 (x, y, θ) を取得	実験値 (x, y, θ) から乱数を振り π^- とする
シリカエアロゲル	Cherenkov 光の輻射体 放射点は不特定	輻射体中の π^- の軌跡から光子ベクトルを返すよう乱数を指定
レンズ	Cherenkov 光を集光する	上記の光子を Snell の法則に従いベクトルを変化
FP-PMT	ADC 情報から threshold を超えた channel の pixel 中心値を返す	光子のうち pixel に入った場合 pixel 中心値を返す

表 4.7: 実験機器の役割とそれに対応するシミュレーションの働き

シミュレーション項目	輻射体 - 光検出器 間距離 [mm]	Cherenkov 角度情報		光学素子の有無
		mean [rad]	sigma [mrad]	
1.	200	0.2188	12.79	-
2.	140	0.2180	15.50	-
3.	140	0.1585	14.88	使用

表 4.8: シミュレーションにおける Cherenkov 角度情報

測定項目 1. 及び 2. に関して実験結果はシミュレーションとあっていない。特に sigma はその差が大きい。このとについて考えられる主な原因は以下の 3 つである。

1. 各検出器の位置情報による効果

- (a) 実験ではシリカエアロゲルを交換する度にその run をとめねばならない。そのときに各検出器がずれる可能性がある
- (b) MWPC による π^- の track がと RICH 検出器の中心からずれている。

2. バックグラウンドによる効果

- (a) シリカエアロゲルを構成する粒子径は光子の波長に比べ十分に小さいため Rayleigh 散乱を無視することは出来ない
- (b) FP-PMT の読み出し電子回路におけるバックグラウンドの効果

3. Cross talk による効果 マルチアノード光検出器では周囲の pixel に光子が入射したときによる cross talk がある。実験解析ではこの効果を考慮していない。

これらの効果によりシミュレーションよりも実験値の角度分解能は悪くなっていると考えられる。このため sigma の実験値とシミュレーション値の比較を行っていない。

1. と 2. から距離 200mm から 140mm へ近づけた場合、角度分解能は悪化し、実験値の mean 値にも影響し、27mrad もずれている。

測定項目 3. の Compact RICH 検出器の実験結果では図 4.13 から Ring を確認することはできる。ゆえに Compact RICH 検出器の動作確認は成功したといえる。しかし、”Cherenkov ring” という観点からすると課題が残された。現状では Compact RICH 検出器から得られる角度情報は光子放射点と FP-PMT 上の位置情報とによってのみ構成されている。レンズという光学素子を介す場合、光子の伝播を行列を用いて表すと

$$\begin{bmatrix} \rho_{final}(\varphi) \\ \partial_z \rho_{final}(\varphi) \\ \varphi \end{bmatrix} = \mathbf{EDCBA} \begin{bmatrix} \rho_{initial}(\varphi) \\ \partial_z \rho_{initial}(\varphi) \\ \varphi \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

と表記される。ただし、A、B、C、D、E はそれぞれシリカエアロゲル、シリカエアロゲル - レンズ間の空気、レンズ、レンズ - 光検出器間の空気、光検出器の入射窓を表した行列である。

それぞれ媒質の屈折率を n として次式のように表すことが出来る。

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 1 & \Delta z_{aerogel} & 0 \\ 0 & \frac{n_{aerogel}}{n_{air}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \Delta z_{aerogel}: \text{シリカエアロゲル中の距離} \\ \mathbf{B(D)} &= \begin{bmatrix} 1 & L_{gel-lens} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, L_{gel-lens}: \text{シリカエアロゲル - レンズ間の距離} \\ \mathbf{C} &= \begin{bmatrix} 1 & \frac{n_{air}}{n_{lens}} \Delta z_{lens} & 0 \\ -\frac{n_{air}-n_{lens}}{n_{air}} r & 1 - \frac{n_{air}-n_{lens}}{n_{lens} r} \Delta z_{lens} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, r: \text{レンズの曲率半径} \\ \mathbf{E} &= \begin{bmatrix} 1 & \Delta z_{window} & 0 \\ 0 & \frac{n_{air}}{n_{window}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \Delta z_{window}: \text{FP-PMT の入射窓の厚み} \end{aligned}$$

実験値解析においては

$$\begin{bmatrix} \rho_{initial}(\varphi) \\ \partial_z \rho_{initial}(\varphi) \\ \varphi \end{bmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B}^{-1} \mathbf{C}^{-1} \mathbf{D}^{-1} \mathbf{E}^{-1} \begin{bmatrix} \rho_{final}(\varphi) \\ \partial_z \rho_{final}(\varphi) \\ \varphi \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

が必要になる。しかし、この *final* ベクトルに関して $\partial_z \rho$ が一意に決まらないため、角度情報を Cherenkov 角として算出することができていない。これが Compact RICH 検出器における今後の課題として残された。現状での算出方法のまま項目 3. の mean 値評価は実験値とシミュレーション値は一致している。

第5章 HAPD

Belle 検出器における K/π 中間子識別グループは Super-KEKB に向け、粒子識別能力向上を目的に研究開発を行っている。その中の ACC グループでは Belle 検出器 Endcap 部に A-RICH 検出器を導入することにより目的を果たそうとしている。この A-RICH 検出器の光検出器として新型マルチアノード型光検出器 HAPD が考えられている。A-RICH 検出器に関しての原理は第3章で述べた。ここでは A-RICH 用光検出器 HAPD について述べ、現状での HAPD の性能を評価する。

5.1 HAPD

新型マルチアノード型光検出器 HAPD (Hybrid Avalanche Photo Detector) は A-RICH 用光検出器としての導入が予定されている。現在浜松ホトニクス株式会社と共同開発を行っており、HAPD は同社にて試作中である。従来の光電子増倍管による光子検出方法は、光電陰極によって光から光電子に変換され、その光電子は幾重にも連なるダイノードチェーンによって増倍されシグナルとして検出される。一方 HAPD は、真空管に Avalanche フォトダイオード (APD) を配置し、真空管内にかけられた高電位差によって電場加速された光電子を APD に打ち込む。ダイオードが生成した電子-正孔対 (キャリア) はダイオードに印加した逆バイアス電圧によって Avalanche 増倍過程を経て信号として検出される。このように HAPD は光子検出構造に APD を利用し、光電子のエネルギーによって生成されたキャリアを信号とする、従来の光検出器とはまったく異なった新しい光検出器である。

5.1.1 APD

半導体

半導体のモデルが 1931 年に A.H.Wilson によって確立されてから半導体に関する様々な研究が行われてきた。半導体を光検出器へと利用しようとしたのは 1960 年代のことである。

物質の電子エネルギー状態は連続して存在せず、エネルギー状態によって、電子の存在が許された許容帯と存在が許されない禁止帯とに分かれる。物質はまず低エネルギー領域に電子が満たされた許容帯 (充満帯) があり、その許容帯より高いエネルギー領域に禁止帯 (band-gap)、禁止帯のよりも高いエネルギー状態に再び許容帯 (伝導帯) がある。つまり電子のエネルギー状態は禁止帯のために連続していない。この伝導帯における電子の有無によって物質の電気伝導性が決まり、物質は絶縁体と金属に分けることができる。

半導体はこの禁止帯のエネルギー領域が狭い。そのため物質の温度上昇に伴って充満帯からエネルギー位置の高い許容帯に電子が励起され、もともと電子が存在した充満帯には

正孔ができる。この正孔をもつエネルギー領域を価電子帯という。この励起された電子と正孔はともに動くことができるため、半導体は電気伝導性を示すことができる。半導体として知られるものには酸化物、有機化合物などがあり、特に Si などの III 族と V 族の化合物が代表的である。半導体は電気伝導の性質から、電子を励起して負の移動電荷（キャリア）をつくる n(negative) 型、伝導帯が充満帯から電子を吸収し正孔を生じる p(positive) 型とに分けられる。

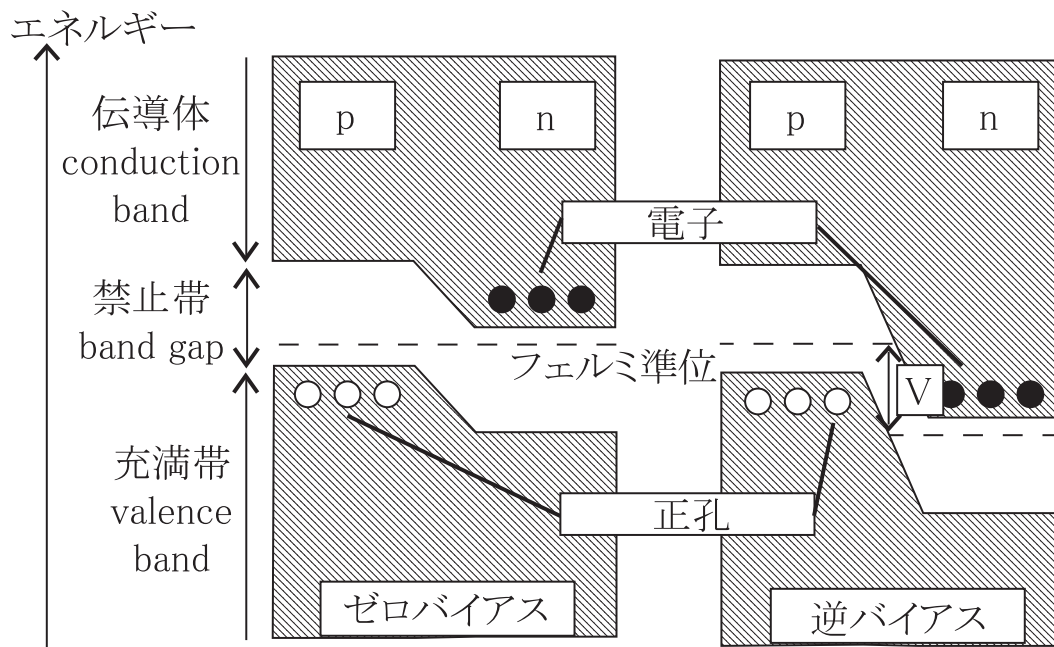


図 5.1: 半導体の p-n 結合

HAPD に利用されている半導体素子

HAPD には pn 接合を利用した Si 半導体素子が使われている。半導体素子は、バイアス電圧を印加しない場合、図 5.1 で示すように pn 接合では接合部で p 型と n 型のフェルミ準位が等しくなりエネルギーバンドに傾きを持っている。半導体素子に順バイアス電圧を印加すると n 型のフェルミ準位が上昇し、このエネルギーバンドの傾きが緩やかになるため pn 間で電流が流れる。逆バイアス電圧を印加した場合、n 型のフェルミ準位が下降し、図のようにバンドの傾きも大きくなるため電流は流れない。

しかし、HAPD のように光検出器として半導体素子を利用する場合、逆バイアス電圧が有効である。一般に、pn 接合の半導体素子を光検出器として利用する場合、半導体素子は光子の入射エネルギーによって電子-正孔対を生成する。この 1 対の電子-正孔対を作り出すのに必要なエネルギーは半導体素子の物質に依存し、Si の場合は 3.64eV である。このため、逆バイアス電圧を印加した場合に光子を入射するとそのときに生成されるキャリアをシグナルとして検出できるため、逆バイアス電圧を印加することが有効となる。

HAPD に使われている半導体素子 APD ではこのキャリアを光電子の入射エネルギーによって得ている。電場加速された光電子が p 側に入射され電子-正孔対を生成する、この

とき APD には逆バイアス電圧が印加されており、電子-正孔対はともに移動可能である。HAPD では Avalanche ダイオードを採用している。Avalanche ダイオードではキャリアを電位差によって加速することにより、キャリアを増倍させるダイオードである。加速によってキャリアを半導体素子の格子に衝突させ、電子を励起することで電子-正孔対をつくり 2 次キャリアをつくる。この現象が繰り返され、キャリアは増倍される (Avalanche 効果)。この Avalanche 効果による増倍は HAPD の読み出し回路の雑音の寄与を小さくする効果がある。HAPD はこのような半導体素子を組み込んでいる。

5.1.2 検出器構造

HAPD の検出器構造を説明するため、比較として光電子増倍管を用いた。図 5.2 は従来の光電子増倍管の構造及び光電子が増倍される様子、図 5.3 は HAPD の構造及び増倍過程の様子を表した模式図である。

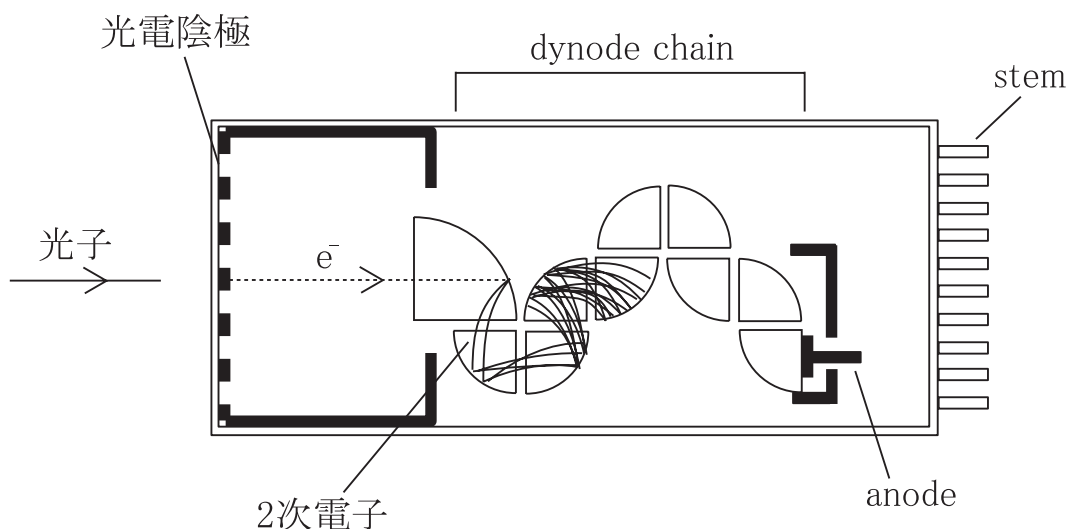


図 5.2: 光電子増倍管の構造断面の模式図

増倍部

従来の光電子増倍管は、光子は光電陰極の電子を励起し光電子を放出する。その後光電子は dynode に到達し、dynode は 2 次電子 (5 ~ 6 個) を放出する。8 から 19 段の dynode で構成された dynode chain によってこの増倍過程は繰り返され最終的なゲインは $10^7 \sim 10^8$ 程度に到達する。この 2 次電子数が 5 ~ 6 と少ないため、1 光電子に対して得られる信号の統計的なゆらぎは大きくなる。

一方 HAPD の増倍過程は、図 5.3 に見られるように、まず光子は光電陰極の電子を励起し、光電子を放出させる。この光電子は光電陰極に印加された高電圧によって真空管内を加速され、真空管内に配置された APD に打ち込まれる。この電場加速による光電子のエネルギーによって APD は電子-正孔対を生成する。このときの電子打ち込みによるキャリア数は 10^3 のオーダーで得られる。その後 APD の電位差によってキャリアは加速され

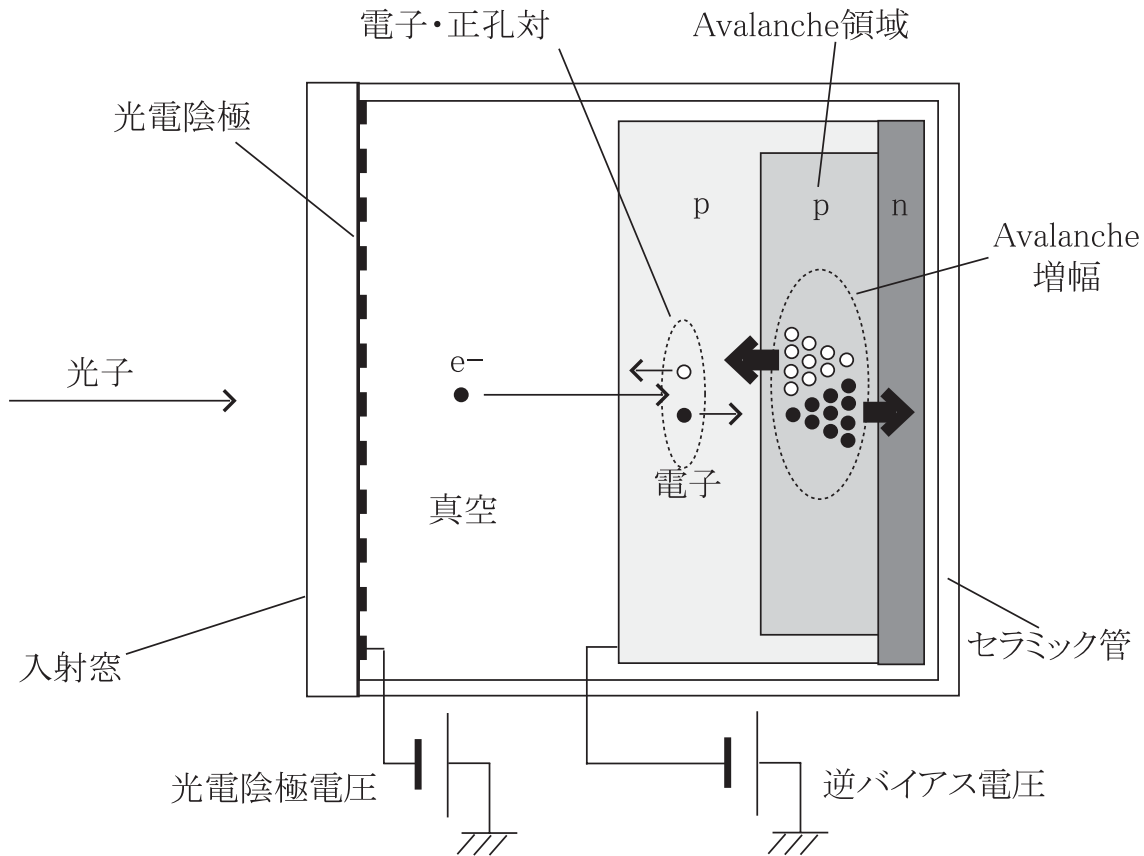


図 5.3: Hybrid Photo Detector 構造断面の模式図

Avalanche 領域に到達する。図中 APD の Avalanche 領域は、ダイオードに混入させる不純物の濃度を濃くし、抵抗値を上げている。そのため同一の APD 内で Avalanche 領域では電圧値が急激に変化する。ゆえに急激に加速されたキャリアが格子に衝突し、Avalanche 効果を起こす。この Avalanche 効果によってさらにオーダーで 10 倍のゲインを得ることができる。この電場加速によるゲインと Avalanche 効果によるゲインの 2 段の増幅過程を経て、最終的な HAPD の生むゲインは 10^4 のオーダーである。電子打ち込みによる高ゲインは APD を構成する Si が 3.64eV という非常に小さな入射エネルギーによって 1 対の電子-正孔を生成することに起因している。電子打ち込みによって 1000 の電子・正孔対が得られるため、信号の統計的なゆらぎが小さく、波高の揃った 1 光電子の応答が得られる。

また、144 channels HAPD ではマルチアノード光検出器にするために、APD にピクセルを設けてある。マルチアノード用 APD は、1 つの n 型ダイオードにピクセル数だけ、p 型ダイオードを設置したものである。

規格

144 channels HAPD の開発にあたって、規格の小さな 3×3 channels HAPD が試験用に開発された。図 5.4 は 3×3 channels HAPD の外観である。表 5.1 に浜松ホトニクス株式会社より提供された規格を、表 5.2 に特性を載せた。今回完成された 144 channels HAPD の外観は図 5.5 に、その規格と特性を表 5.3、5.4 に載せた。144 channels HAPD は光電管

内に APD 4 chip を 2×2 行列に配置してあり、APD は図 5.5 のように光電面側から見て左下から時計回りに chip-A、B、C、D と名づけられている。1つの APD のピクセル数は 6×6 pixels/chip となっている。今回のものでは chip-A 及び D のみが生きた APD である。

5.1.3 A-RICH 用光検出器 HAPD

A-RICH 用光検出器として 144 channels HAPD を採用することが予定されている。そのため、HAPD には single photon のシグナル分離が要求される。HAPD はその Si 半導体素子を利用していることから 1 光電子打ち込みによるゲインが高く、シグナルの分解能が良い。更に Belle 検出器 Endcap 部に設置する場合、HAPD 内の電場ベクトルと 1.5T の磁場のベクトルはほぼ平行と考えられる。このため磁場中での稼働はもちろん、シグナルの高分解能が期待されている。

parameter		discription/value	unit
photon response		160-850	nm
photocathode	material	multi-alkali	-
	outline of effective area	$\phi 25$	mm
input window		synthetic quartz	-
pixel	outline	5×5 each	mm
	number of pixels	$9(3 \times 3)$	-
number of stem pins	anode	9	-
	cathode	1	-
maximum supply voltage	photocathode	-8500	V
	AD	320	V

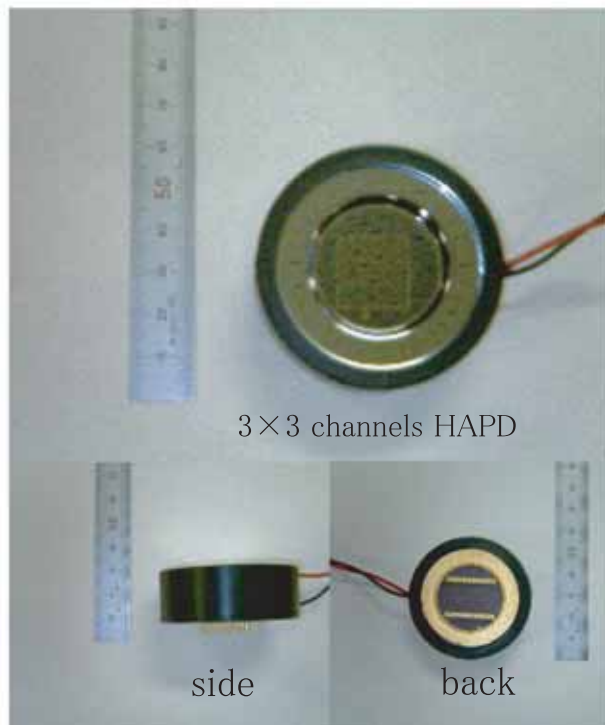
表 5.1: 3×3 channels HAPD の規格 (提供: 浜松ホトニクス株式会社)

parameter	discription/value	unit
quantum efficiency(at 420nm)	1.7	%
capacitance of APD	73	pF
AD supply voltage (gain=10)	290	V
bombardment gain	1473	-
total gain	25866	-

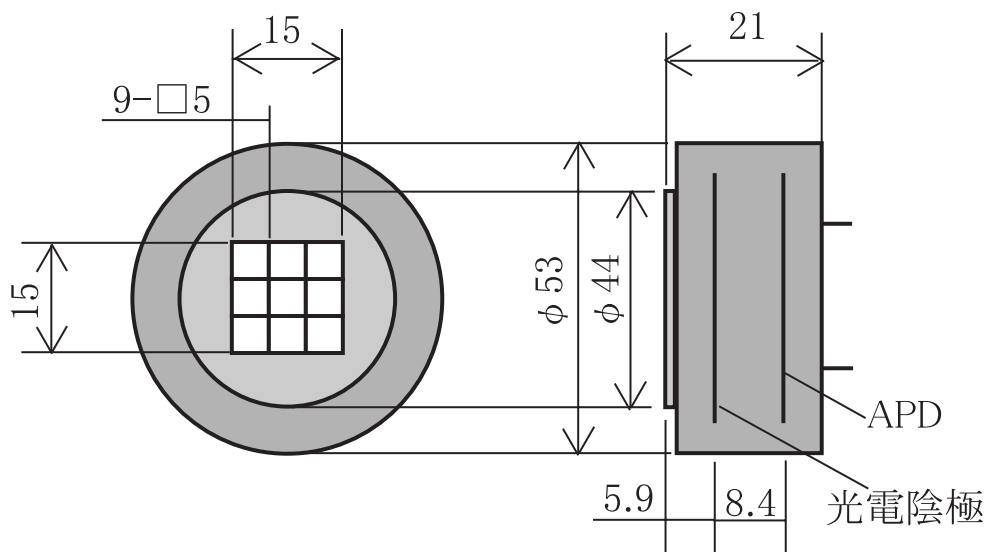
表 5.2: 3×3 channels HAPD の特性 (提供: 浜松ホトニクス株式会社、測定値)

5.2 測定

HAPD の現状での性能を評価するに当たり、A-RICH 用光検出器としての効果に重点をおき、photon resopnse による測定を行った。実際 A-RICH 検出器で測定する光子は単一

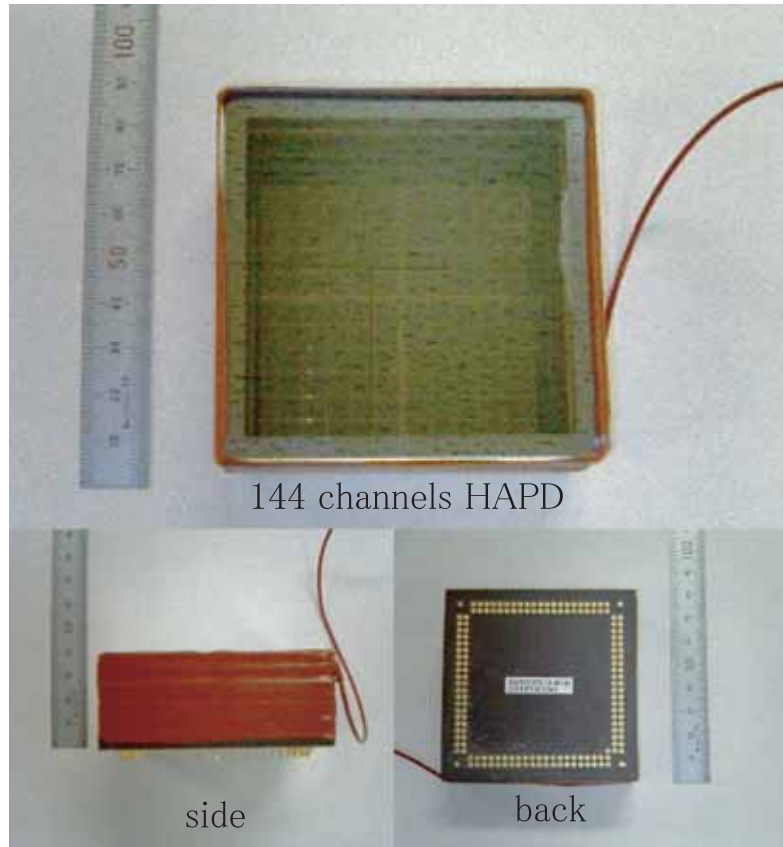


3×3 channels HAPD 概観

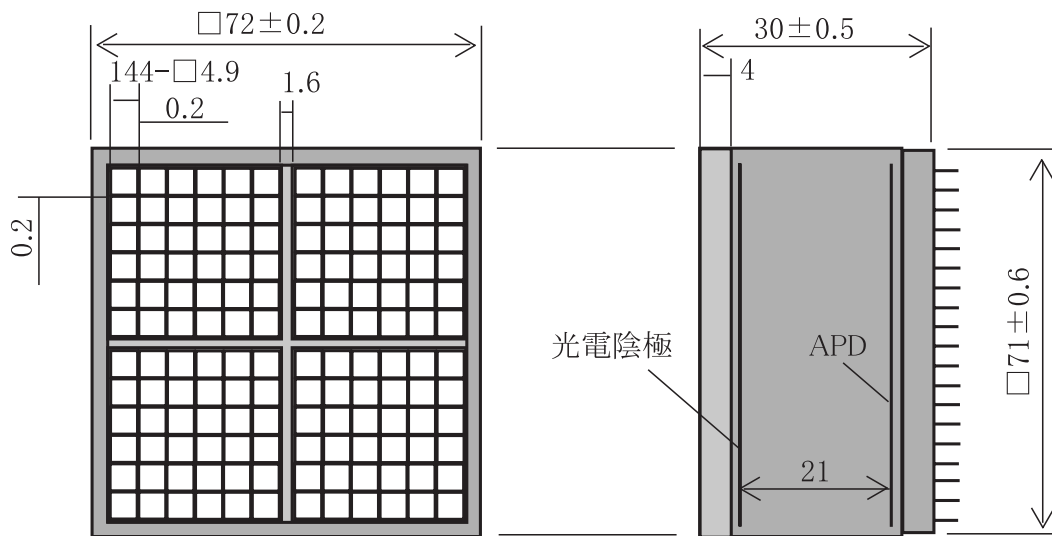


3×3 channels HAPD 寸法

図 5.4: 3×3 channels HAPD の外観及び寸法



(a) 144 channels HAPD の外観



(b) 144 channels HAPD の寸法

図 5.5: 144 channel HAPD の外観及び寸法

parameter		discription/value	unit
photon response		160-850	nm
photocathode	material	multi-alkali	-
	outline of effective area	64×64	mm
input window		synthetic quartz	-
pixel	outline	4.9×4.9 each	mm
	number of pixels	144(12×12)	-
number of stem pins	anode	144(64×4 chips)	-
	cathode	4(1×4 chips)	-
maximum supply voltage	photocathode	-8500	V
	AD(2 chips, 2 of 4 chips dead)	388 each	V

表 5.3: 144 channels HAPD の規格 (提供: 浜松ホトニクス株式会社)

parameter	discription/value	unit
quantum efficiency(at 420nm)	6.6	%
capacitance of APD(at $V_{AD} = 300V$)	80	pF
AD supply voltage (gain=10)	360	V
bombardment gain	1200	-
total gain(chip-A,ch-22)	11800	-

表 5.4: 144 channels HAPD の特性 (提供: 浜松ホトニクス株式会社、測定値)

波長であり、短波長の光子は Rayleigh 散乱の効果によって観測されず、検出光子の波長のピークはおよそ 400nm である。そのため、測定では光源として LED(420nm) を使用した。暗箱内に HAPD と HAPD の target channel に接続した前置増幅器、光源 LED を設置した。LED には Pulse Generator からのパルスが入力される。LED 光が HAPD の target pixel のおよそ中央に照射されるように光源と検出器を固定した。HAPD からのシグナルは前置増幅器で増幅され、暗箱の外にある整形増幅器を通った後、観測するシグナルとなって出力される。Trigger は Pulse Generator によってかけている。このシグナルは AMPTEK 社製の Multi-Channel Analyzer MCA8000A によって取得される。このデータ取得に使用した DAQ システムを図 5.6 に示した。

図 5.7 は実際に 3×3 channels HAPD 及び 144 channels HAPD のシグナル取得に使用した読み出し回路のブロック図である。この回路において、APD に印加する逆バイアス電圧の極性によって異なる点は、正極性の場合には filter 内の抵抗 R が大きいいためコンデンサ C を使うことで APD の信号をループさせている点である。

測定項目は以下の通りである。

1. 3×3 channels HAPD

(a) photon 応答

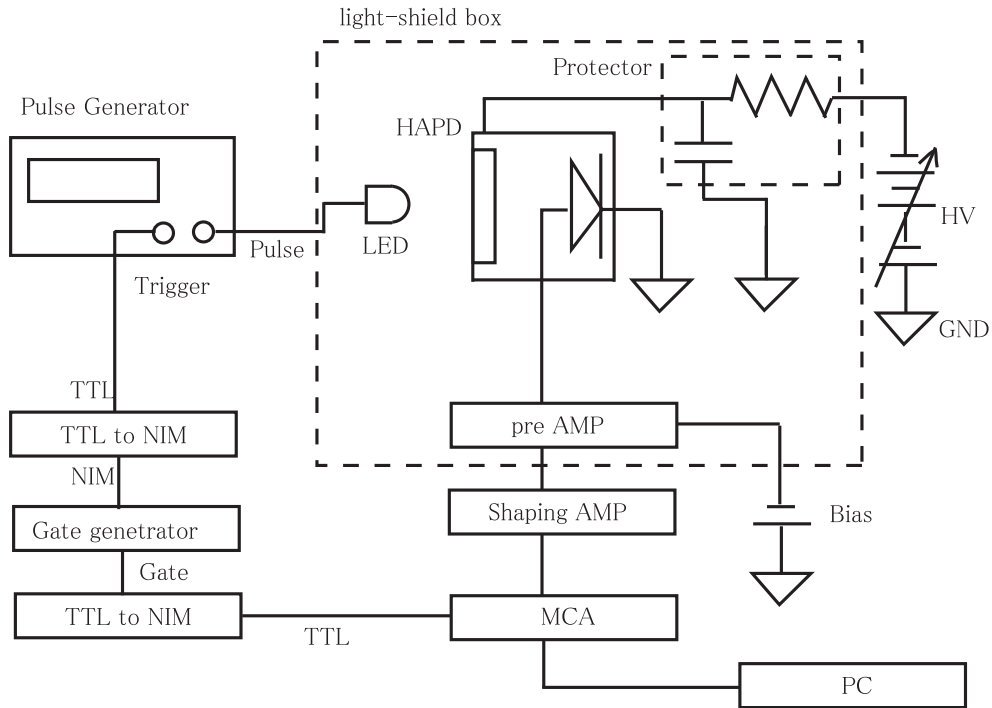


図 5.6: DAQ システム

A-RICH 検出器では 1 光電子のシグナル分離が重要となる。そのため 1 光電子の分布を調べることにした。また HAPD の Si 半導体素子 APD を利用した特性として multi-photon (2 ~ 3 の光電子数の分布を作る光量) に対してのシグナルも各光電子数に応じてシグナルのピークを確認できるはずである。このため、photon 応答では 1 光電子、数光電子の分布をつくりだす LED の光量を single photon、multi-photon とそれぞれ定義し、これらの光量を 1 channel に照射し、その channel のみを読み出すことにより HAPD の性能を評価した。

(b) 逆バイアス電圧の極性

HAPD の特性を損なわないためには高利得、低雑音の回路をもってシグナルを読み出す必要がある。HAPD は全 channel に対応してそれぞれに anode を持っており、cathode は 1 つにつながれている。RICH 検出器では全 channel 同時読み出しを行うときには、cathode 側から正電圧を印加することにより APD を逆バイアス状態にする予定である。そのため、1 channel あたりの読み出しにおいて正負両方の極性の逆バイアス電圧を APD に印加して photon 応答を確かめた。

(c) 整形時定数

読み出し増幅回路において等価雑音電子数 (Equivalent Noise Charge) N_{enc} と整形時定数 (shaping time constant) T_M の間には、係数 α 、 β 、 γ を以って

$$N_{enc} \propto \alpha T_M + \frac{\beta}{T_M} + \gamma \quad (5.1)$$

の関係がある。そのため、整形増幅器の整形時定数を 0.5、1.0、2.0 μs の 3 段階に調節することによって整形時定数の single photon 応答を調べた。

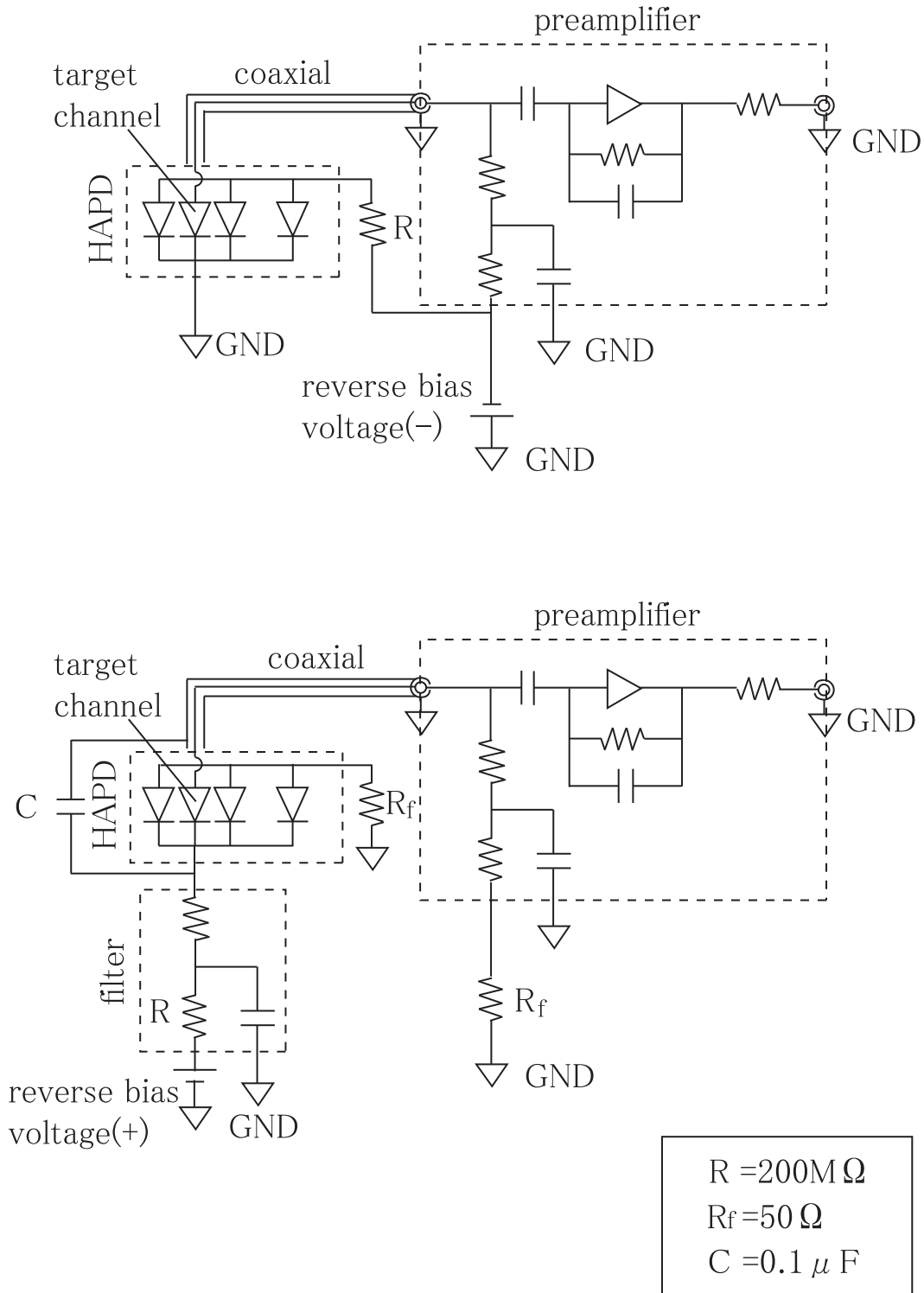


図 5.7: APD シグナル取得用回路: 印加逆バイアス電圧の極性による違い

2. 144 channels HAPD

(a) photon 応答

項目 1.(a) 同様に photon 応答によって RICH 用光検出器としての性能を確かめた。

(b) 逆バイアス電圧の極性

144 channels HAPD では負極性の逆バイアス電圧を印加させたときの photon 応答のみ確かめた。時間の制約があったため、正極性逆バイアス電圧は試すことができていない。

(c) 印加電圧

APD に印加する逆バイアス電圧の大きさと、光電陰極に印加する電圧の大きさよっての single photon 波高分布がどのように影響を受けるかを調べた。

(d) 整形時定数

項目 1.(c) と同様である。

(e) 入射位置、入射角度

Cherenkov 光は光検出器に対して角度をもって入射する。そこで LED 光の光電面に対する入射位置、及び入射角を変化させ、そのときの 1 光電子分布の変化を調べた。

(f) 1APD 内各ピクセルの信号のばらつき

1 chip における各ピクセルの 1 光電子分布のばらつき、効率 (efficiency) を調べた。ただし、APD 内のピクセルがすべて同じ性能とは限らないため量子効率と区別し、ここでは単に効率と呼ぶ。

(g) 1 pixel が周囲の pixel に与える cross talk

1 pixel に対して直径 1mm のライトスポットを $500\mu\text{m}$ 間隔で照射したときの他の pixel への cross talk を調べた。LED 光照射位置における信号を全ての位置で同時測定し、ある波高以上のイベント数を cross talk と呼ぶことにする。pedestal 分布とイベントを分離するために threshold 電圧値以上の信号を計測している。

(h) cross talk

マルチアノード型光検出器としての性能を評価した。1 chip 内の各 pixel 中央に直径 1mm のライトスポットを照射したときの cross talk を調べた。

5.2.1 結果

1. 3×3 channels HAPD

測定に用いた前置増幅器及び整形増幅器はそれぞれ ORTEC 社製の 142A、671 を使用した。

AD voltage	Photocathode voltage	T_M	整形増幅器ゲイン
-320V	-8kV	$0.5\mu s$	100
+320V	-8kV	$0.5\mu s$	100

表 5.5: 3×3 channels HAPD 測定諸設定

(a) photon 応答

図 5.8 は APD に負極性の逆バイアス電圧を印加した (表 5.5) ときの photon 応答の様子である。single photon、及び multi photon を ch-3 のほぼ中央に照射したときの波高分布である。図中グラフの横軸は電圧、縦軸はイベント数である。図 5.8 に見られる破線の分布は光を照射しないときの pedestal 分布である。1 光電子が pedestal と分離し、peak として確認できる。ここで HAPD の性能を示すものとして、シグナルの分離度 N_σ を次のように定義する。

$$N_\sigma = \frac{\mu_{\text{signal}} - \mu_{\text{pedestal}}}{\sigma} \quad (5.2)$$

ここで μ は波高分布を Gaussian で fit したときの mean 値、 σ はその時の標準偏差 σ である。これによると single photon 応答における分離度は

$$N_\sigma = 7.7 \quad (5.3)$$

であった。

図 5.8(b) は multi-photon を照射したときの波高分布である。各光電子数における peak 値の分離を確認することができた。

(b) 逆バイアス電圧の極性

図 5.9 は同様に ch-3 を標的に選んで、HAPD の cathode に正極性の逆バイアス電圧を印加したときの photon response に対する波高分布である。図中 (a) は single photon 応答、(b) は multi-photon 応答 の波高分布である。波高分布の測定には負逆バイアス印加時と同量の光量を使った。1 光電子のピークを確認することはできたが、正逆バイアス電圧を印加した場合、single photon に対する分離度 N_σ は

$$N_\sigma = 3.4 \quad (5.4)$$

となった。負逆バイアス電圧印加時に比べ N_σ は 44.2% と悪くなっている (図 5.10 参照)。また、pedestal 分布を見ると明らかに図 5.8(a) の pedestal 分布よりも多い。また、multi-photon に対して peak 値の分離を確認することができた。

pedestal を除いた横軸の最も値の低い peak が single photon 分布の peak 値と一致していることから、この peak が 1 光電子、以降 2、3 光電子と判別することができた。

(c) 整形時定数

整形時定数を ORTEC671 によって 0.5、1.0、2.0 μs に設定したときの single photon に対応する波高分布への影響を図 5.11、5.12 に示した。このとき波高分布を

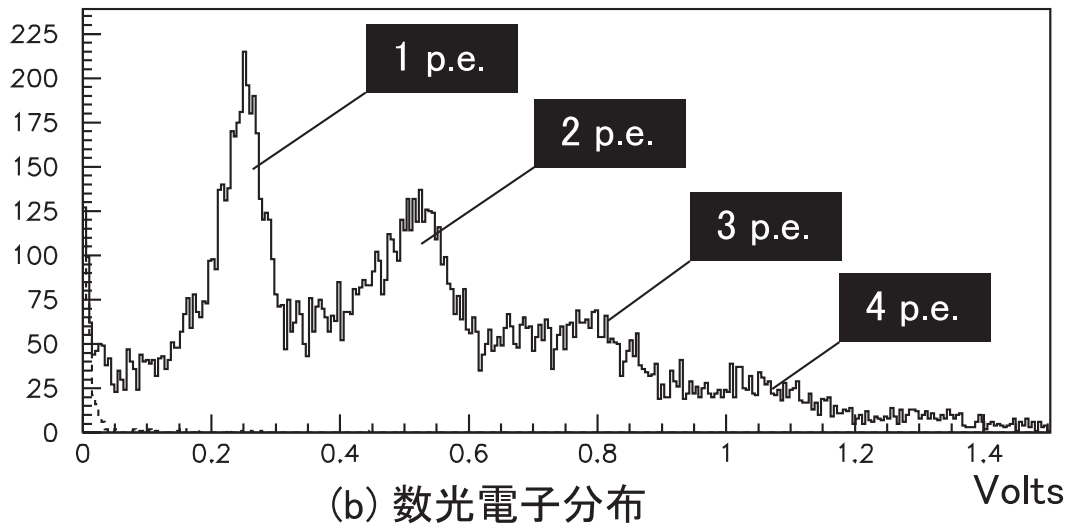
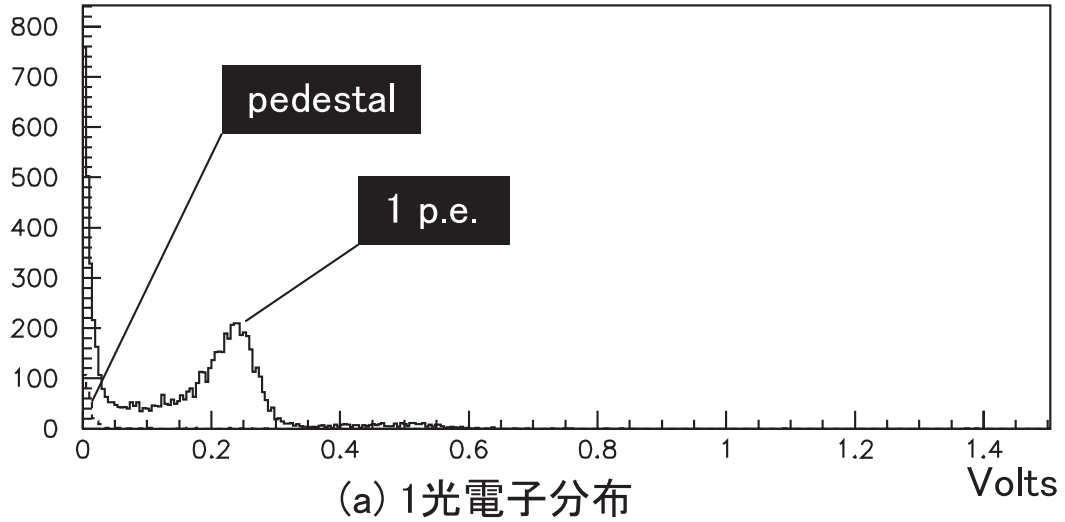


図 5.8: 3×3 channels HAPD 負逆バイアス電圧印加時の photon 応答 : $T_M = 0.5\mu s$

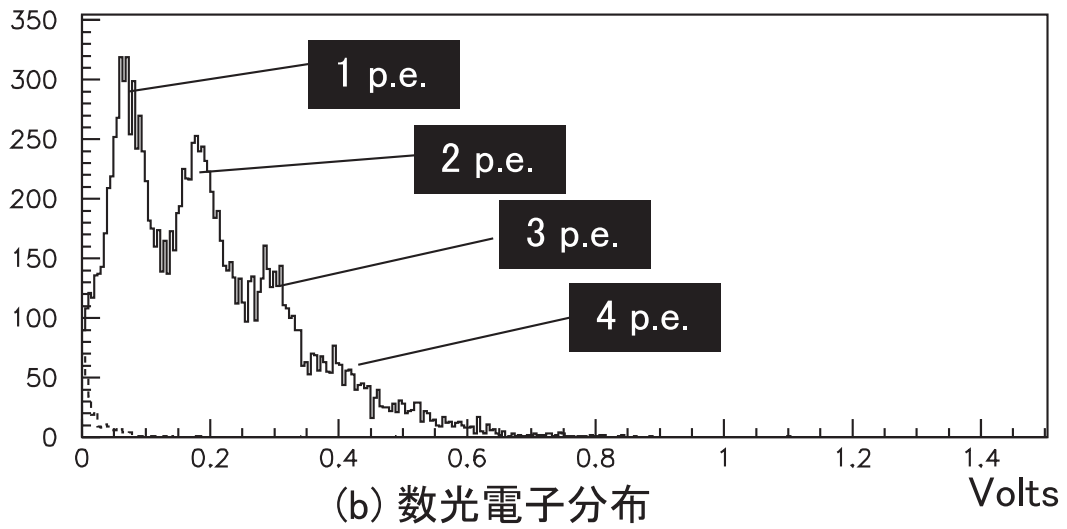
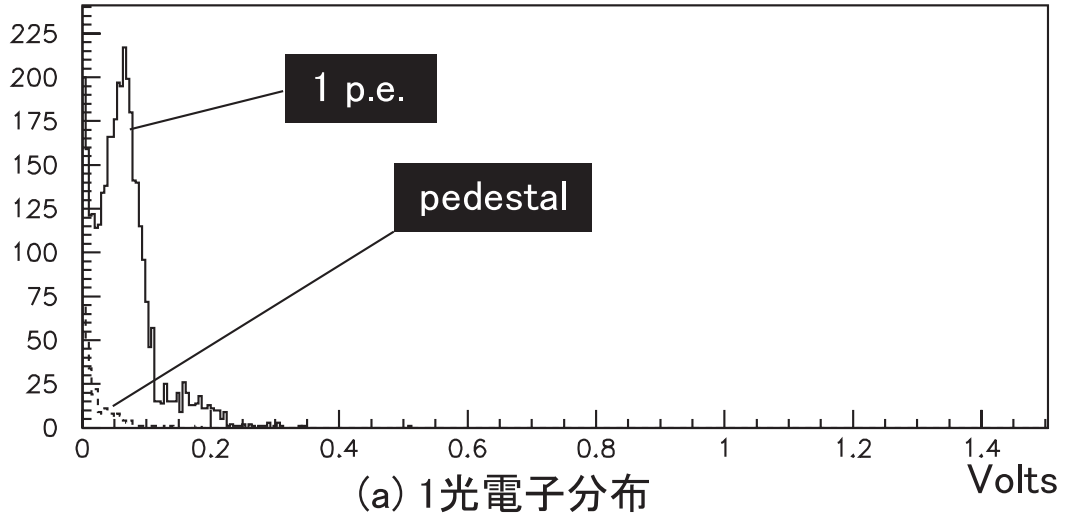
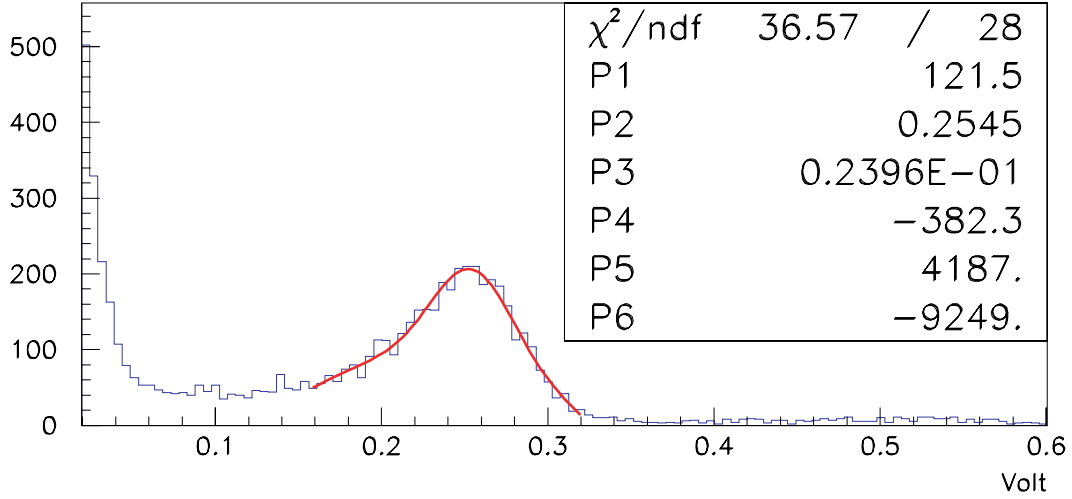


図 5.9: 3×3 channels HAPD 正逆バイアス電圧印加時の photon 応答 : $T_M = 0.5\mu s$

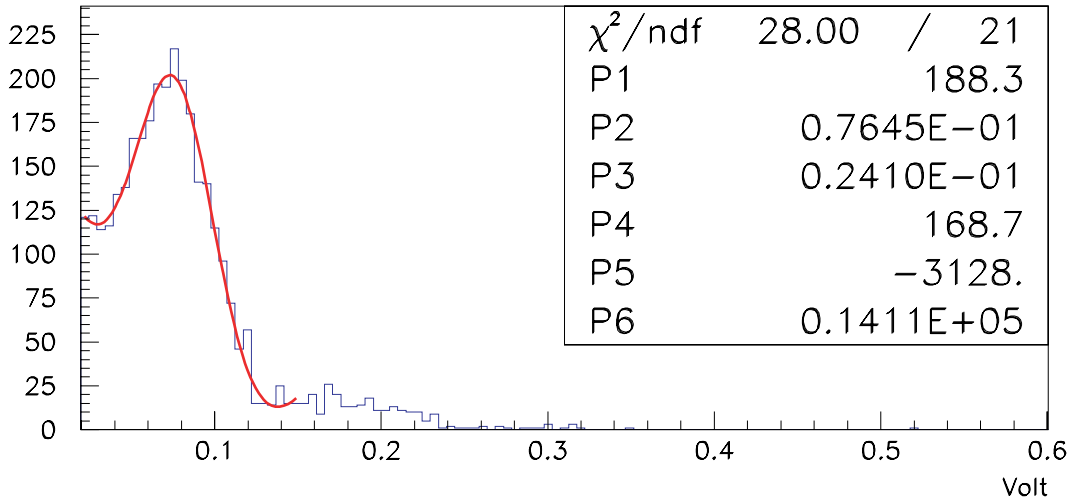
Gaussian で fit し、その時の mean 値の変動と雑音の変動の様子を示したものが図 5.13、5.14 である。ここで、雑音を 1 光電子数分布の FWHM (FWHM=2.35 σ) で表示してある。図の μ に対しては 1 次関数、雑音 (noise) に対しては式 5.1 によって fit したときの値を表 5.6 にまとめた。

負逆バイアス電圧印加 (図 5.13)				
Parameter		Value	Error	Unit
μ 変動	P1	2.365×10^{-1}	5.569×10^{-4}	V/ μ s
	P2	-2.832×10^{-3}	4.358×10^{-4}	
noise 変動	P1	3.995×10^{-1}	2.494	V/ μ s
	P2	8.482×10^{-3}	2.494	V $\cdot\mu$ s
	P3	3.713×10^{-2}	5.745	V
正逆バイアス電圧印加 (図 5.14)				
Parameter		Value	Error	Unit
μ 変動	P1	7.556×10^{-2}	4.667×10^{-4}	V/ μ s
	P2	-1.162×10^{-2}	3.323×10^{-4}	
noise 変動	P1	2.279×10^{-2}	2.494	V/ μ s
	P2	8.194×10^{-3}	2.494	V $\cdot\mu$ s
	P3	2.538×10^{-2}	5.745	V

表 5.6: 整形時定数を変化させたときの 1 光電子波高分布の mean、noise に対して fit したときの parameter



(a) APD に負逆バイアス電圧を印加したときの波高分布



(b) APD に正逆バイアス電圧を印加したときの波高分布

図 5.10: 逆バイアス電圧極性によるゲイン差

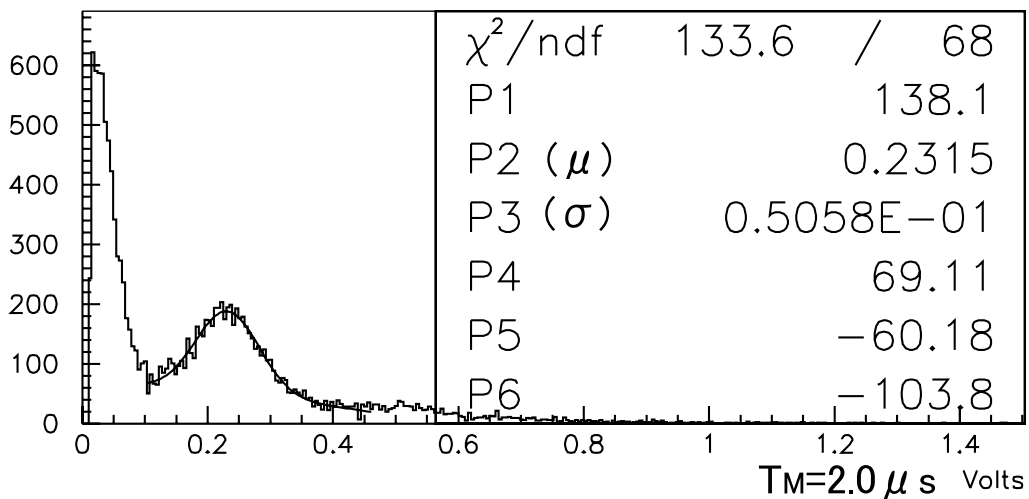
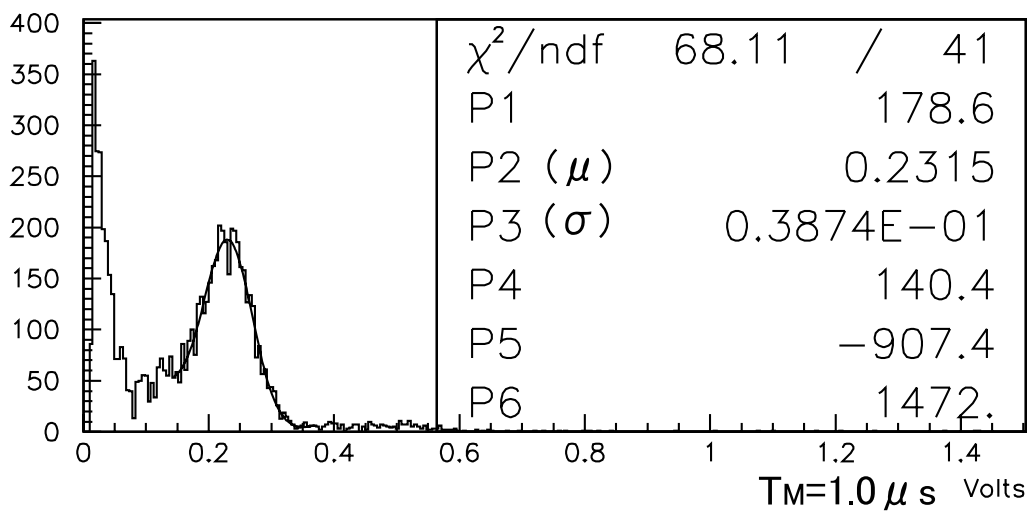
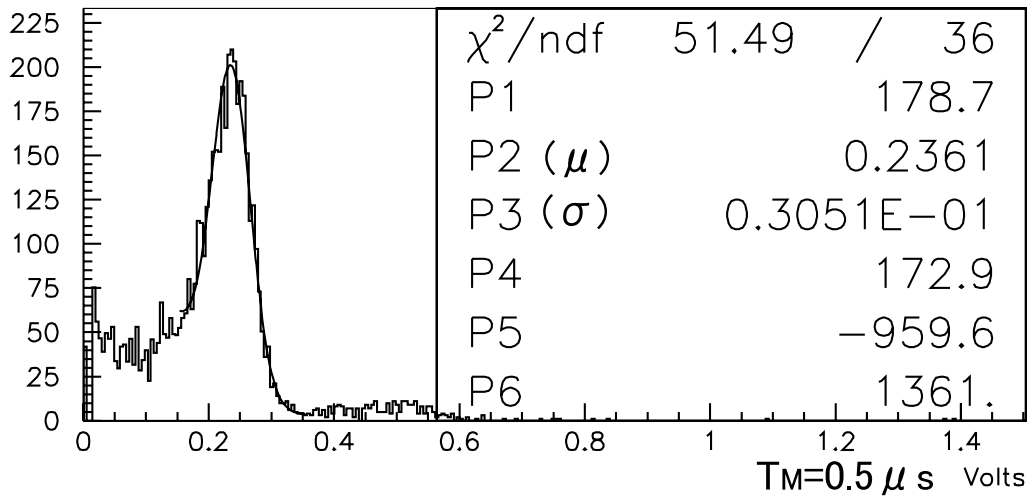


図 5.11: 整形時定数 T_M の single photon に対応する波高分布への寄与 (負極性逆バイアス電圧)

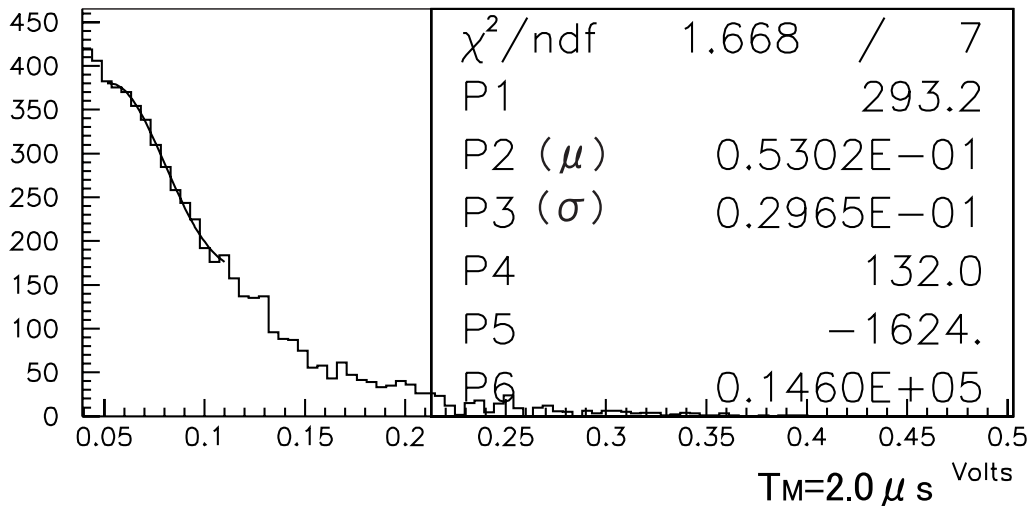
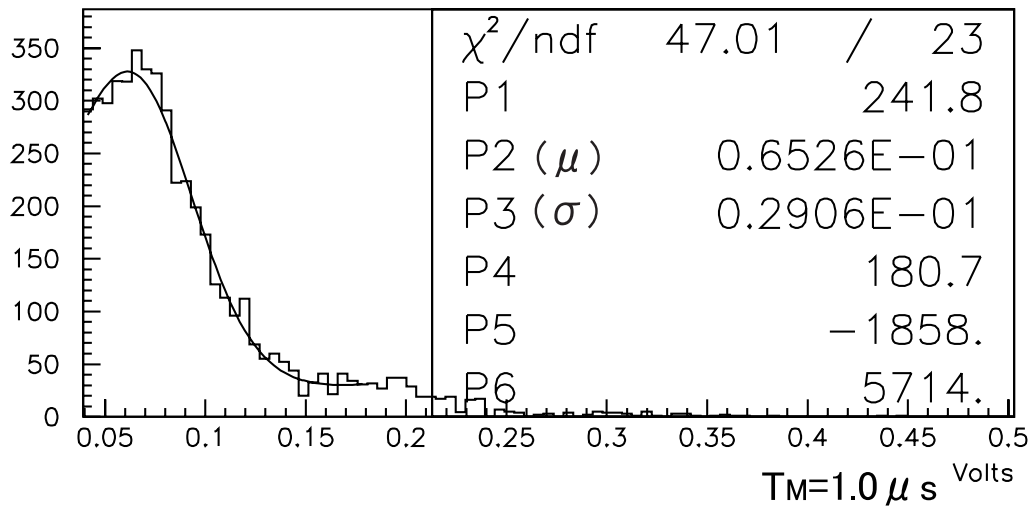
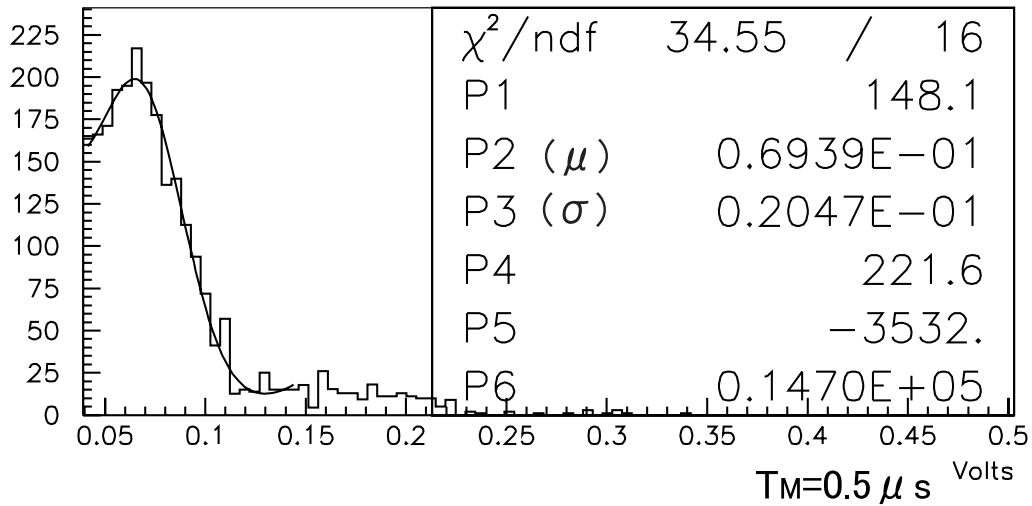


図 5.12: 整形時定数 T_M の single photon に対応する波高分布への寄与 (正極性逆バイアス)

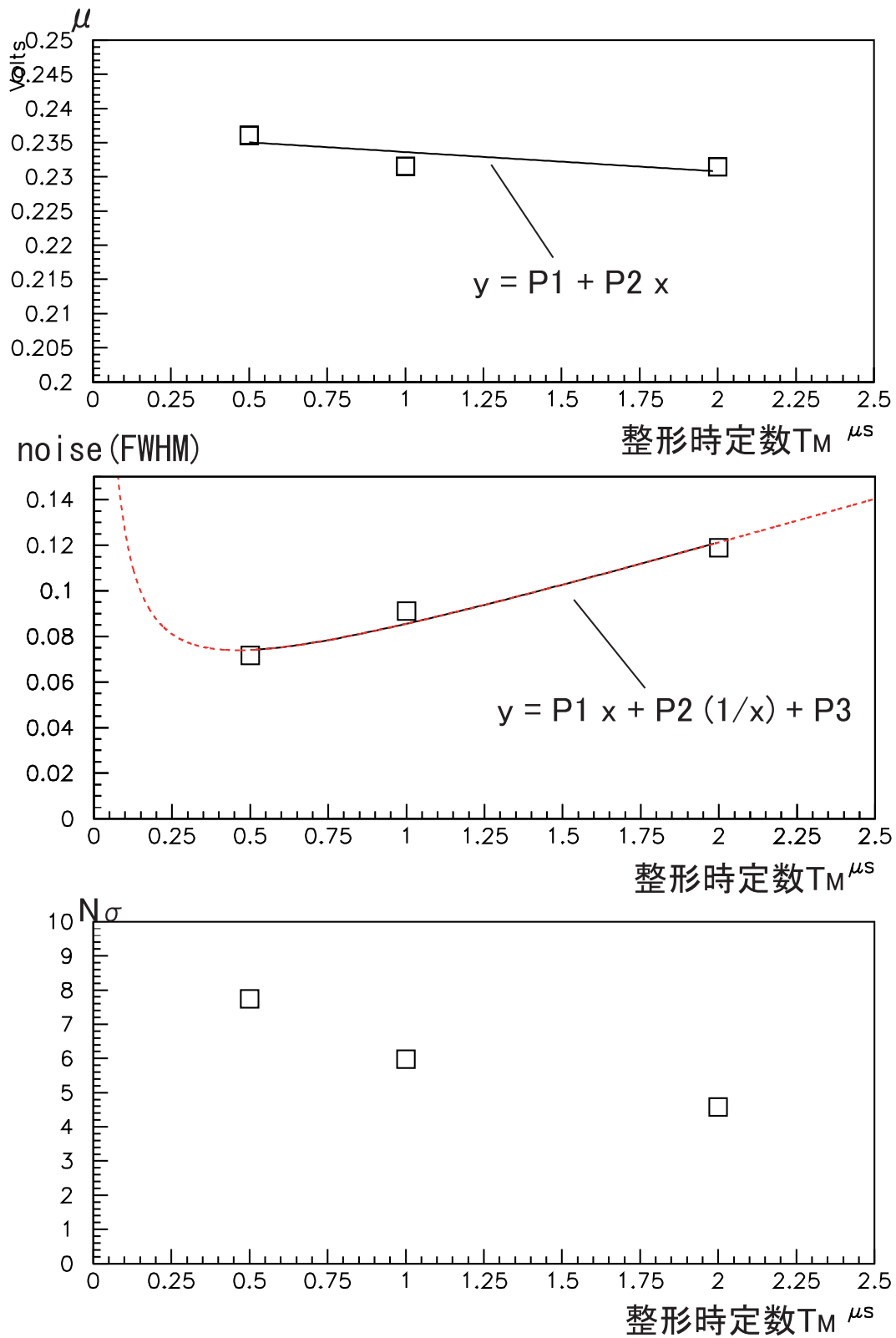


図 5.13: 整形時定数 T_M の信号への寄与:APD に負極性の逆バイアス電圧を印加したときの mean 値 (μ), noise(FWHM) 及び N_σ の変動

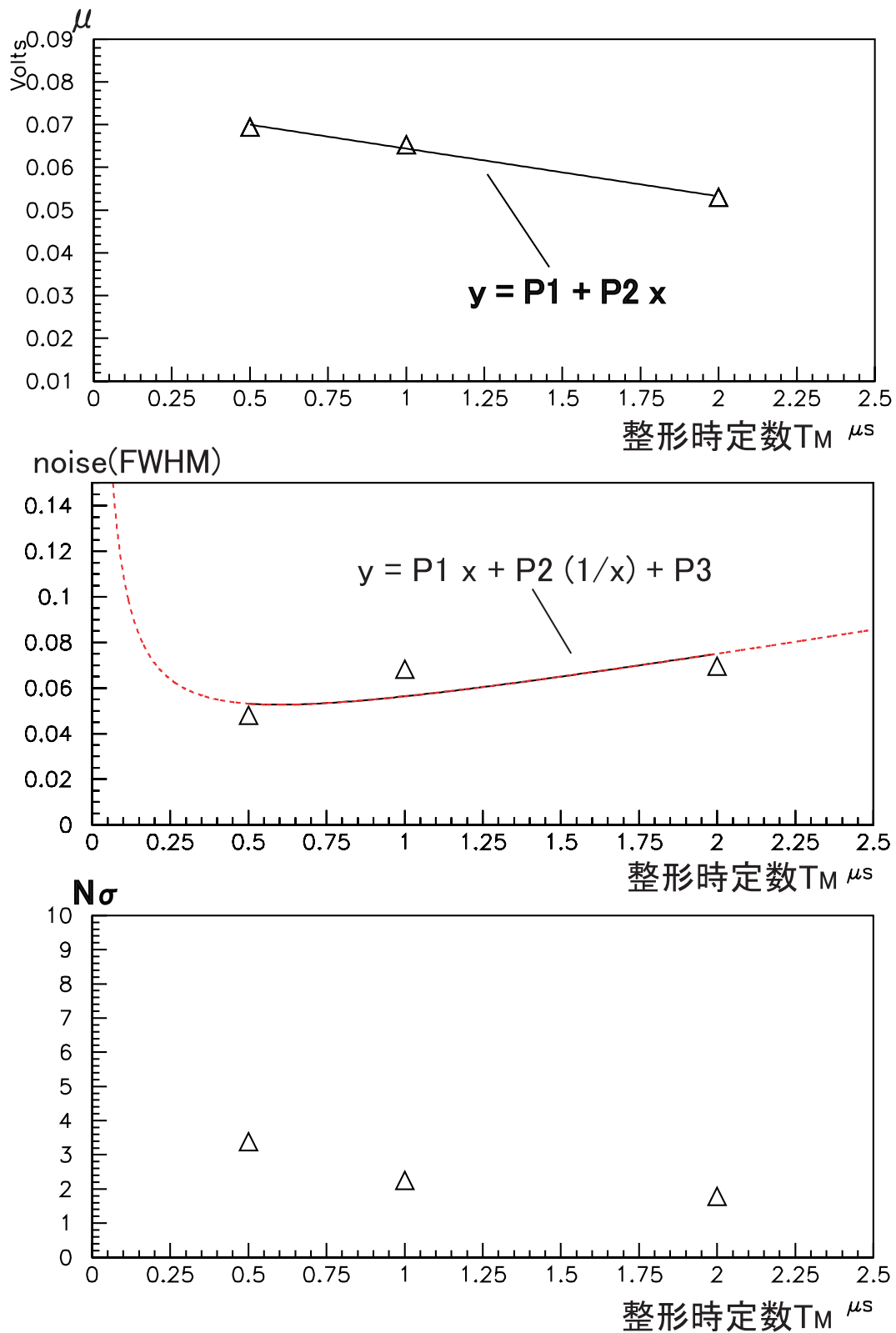


図 5.14: 整形時定数 T_M の信号への寄与: APD に正極性の逆バイアス電圧を印加したときの mean 値 (μ), noise(FWHM) 及び $N\sigma$ の変動

2. 144 channels HAPD

測定に用いた前置増幅器及び整形増幅器はそれぞれ CLEAR-PULSE 社製の 580K と 4032 である。580K は電荷有感増幅器で電荷電圧変換率は 2.0V/pC であり、内蔵された電圧増幅回路によって 11 倍のゲインを得る。144 channels HAPD の測定に関しては図 5.15 に示すように HAPD を固定し、Stage controller を使って光源を動かせるようにした。Stage controller はシグマ光機株式会社製の MARK-202 である。MARK-202 は $2\mu\text{m}$ の間隔で図の x 、 y 軸に平行移動可能である。また 144 channels HAPD の場合も APD へ印加する電圧は 1 chip が同電位になるように設定してある。全ての LED を光源とする測定では Pulse Generator からパルスを入力している。

測定の前に HAPD の雑音評価と APD の信号をオシロスコープで観測を行った。まずはその結果である。図 5.16 は前置増幅器 580K の TEST 入力端子に 1.9mV の pulse を Pulse Generator から入力し、そのときの検出器容量に対する読み出し回路を含めた雑音を評価したものである。テストパルスの大きさは HAPD のゲインから single photon の光量と等価になるようにしてある。横軸には容量 (pF) をとり、縦軸に雑音を表すように electron 数をとっている。図中白抜きのプロットが各整形時定数による読み出し回路の雑音に対応している。色つきのプロットが HAPD を接続したときの読み出し回路と HAPD 自身及び周囲の環境による雑音である。雑音は

$$\sqrt{N_{\text{readout}}^2 + N_{\text{HAPD}}^2 + N_{\text{surroundings}}^2}$$

によって表され、このとき読み出し回路を除いた HAPD と環境による雑音の大きさが 3745electron であることが判った。

次に、オシロスコープでの観測結果である。図 5.17、5.18 はそのときの様子を示している。両者とも HAPD に LED 光を照射している。このとき図 5.17 では chip-D の中にある dead channel にも同電位となるように設定した。その場合、trigger に非同期的な信号が多発した。dead channel を除いた場合は図 5.18 である。この場合は同期信号が見えている。dead channel に電圧を印加することは不適切であると思われるが、詳しい測定を行っていない。

(a) photon 応答

測定 channel は chip-D の ch-22 である。このときのライトスポットの位置を Stage controller 上で原点に決めた。表 5.7 に測定時の設定を載せた。

AD voltage	Photocathode voltage	T_M	整形増幅器ゲイン
-340V	-8kV	0.5 μs	1

表 5.7: 144 channels HAPD の 1 channel 読み出し時の設定

図 5.19 は表 5.7 の設定値の時の LED 光照射による波高分布である。single photon に対する波高分布が確認できた。このときの single photon に相当するシグナル分離度 N_σ は、

$$N_\sigma = 4.1 \tag{5.5}$$

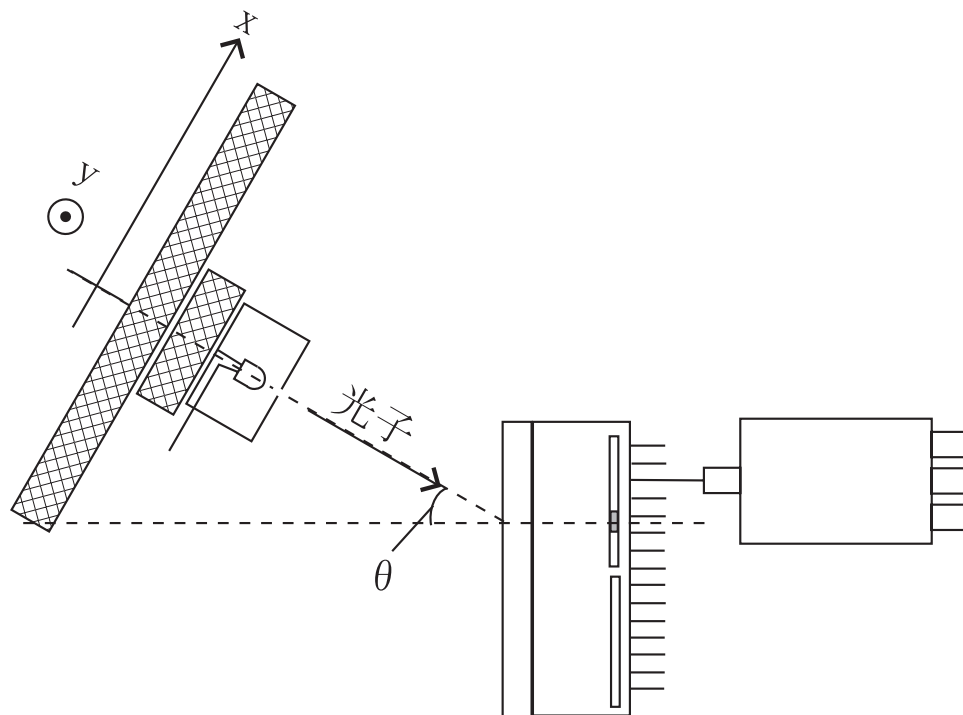
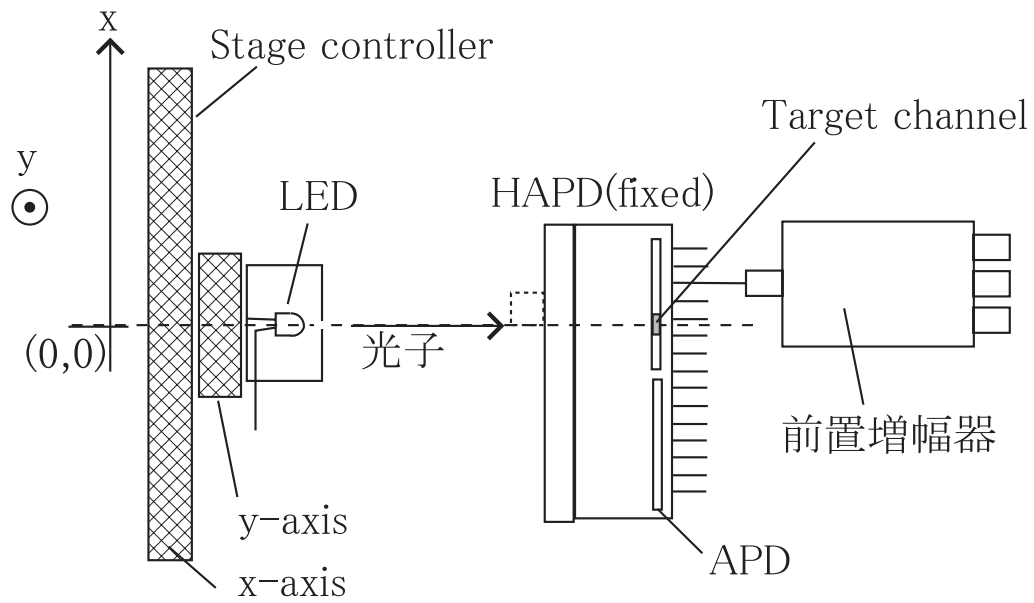


図 5.15: 144 channels HAPD 用信号観測システム

となった。現状で N_s を 3×3 channels HAPD と比較すると 3×3 に対して、41.7% である。multi-photon に対する波高分布も得られ、各々の光電子に対する peak の分離も確認できた。

(b) 逆バイアス電圧の極性

時間の制約のため今回の測定では負極性の場合のみ行った。

(c) 印加電圧

図 5.20 は光電陰極の印加電圧を -8kV に固定し APD のバイアス電圧を変化させていった時の single photon 照射に対する波高分布の様子を表したものである。また逆に APD のバイアス電圧を -340V に固定し、光電陰極の印加電圧を変化させていったときの波高分布の様子を図 5.21 に示した。また、このときの 1 次関数 fit の様子を表 5.8 にまとめた。

Parameter		Value	Error	Unit
APD 逆バイアス電圧を変化 図 5.20	P1	4.490×10^{-1}	8.350×10^{-3}	V/V
	P2	1.612×10^{-3}	2.500×10^{-5}	
光電陰極電圧を変化 図 5.21	P1	2.097×10^{-2}	1.662×10^{-3}	V/kV
	P2	1.064×10^{-2}	2.396×10^{-4}	

表 5.8: 波高分布の mean の変動に 1 次関数によって fit したときの parameter

また、この結果から逆バイアス電圧が 320V 、 330V 、 340V のときにもっとも 1 光電子分布の σ が小さく、光電陰極印加電圧が -8kV のときにもっとも σ が小さくなることが判った。そのため印加電圧は逆バイアス電圧 -340V 、光電陰極印加電圧 -8kV のもと測定した。

(d) 整形時定数

図 5.22 は整形時定数を 0.5 、 1.0 、 $2.0\mu\text{s}$ と設定したときに single photon 照射に対する波高分布への寄与の様子を表している。このときの波高分布に Gaussian と 2 次関数によって fit したときの mean 値及び雑音の振る舞いを示したものが図 5.23 である。この mean 値の変動に対して 1 次関数によって fit とし、雑音に関しては式 5.1 によって fit した。このときの各係数を表 5.9 にまとめた。

Parameter		Value	Error	Unit
mean の変化 図 5.23	P1	1.081×10^{-1}	6.300×10^{-4}	$\text{V}/\mu\text{s}$
	P2	-9.836×10^{-3}	6.078×10^{-4}	
雑音への影響 図 5.23	P1	3.715×10^{-2}	2.494	$\text{V}/\mu\text{s}$
	P2	5.432×10^{-3}	2.494	$\text{V}\cdot\mu\text{s}$
	P3	3.204×10^{-2}	5.745	V

表 5.9: 整形時定数 T_M が mean 値に与える影響 : 1 次関数によって fit したときの parameter

(e) 入射位置、入射角度

表 5.10 はその時の光源の Stage controller 上での位置を示したものである。光源を原点から 0.5mm の間隔でずらしていった。入射角度をつけた場合でも $\theta = 0$ のときと同じ位置に入射するように設定した。

	θ : angle[deg]	r : pixel の中止からの距離 (x 方向)				
[mm]	0	0.5000	1.000	1.5000	2.0000	2.5000
[L]		250	500	750	1000	1250
[mm]	10	0.0868	0.1736	0.2605	0.3473	0.4341
[L]		43	87	130	174	217
[mm]	20	0.1710	0.3420	0.5130	0.6840	0.8551
[L]		86	171	257	342	428

表 5.10: 144 channels HAPD 測定に用いた Stage controller 諸設定 : 1L=2 μ m

chip-D ch-22 で pixel における入射位置と入射角度による波高分布の分離度 N_σ を図 5.24 にプロットした。図から入射位置、入射角度を変えて測定項目 (a) の結果、 $N_\sigma = 4.1$ に比べてほとんど変化していない。

(f) 1APD 内各ピクセルの信号のばらつき

図 5.25 は各 channel ごとの single photon に対応する 1 光電子の波高分布を示したものである。chip 内の読み出し配線の長さは、APD の対角に位置する ch-1 と ch-36 を基準に ch-1 側の channel ほど短く、ch-36 側の channel ほど長くなっている。雑音は読み出し配線の長さに影響するため ch-36 側の channel では、信号分布のゆらぎも大きくなっている。ch-23 はまったくイベントを得ることができなかった。

図 5.25 の pedestal 分布を除くようにそれぞれの channel で threshold 電圧を決定し、threshold 以上のイベント数を効率として表示したものが図 5.26 である。ch-36 のイベント数を基準として、その他の channel のイベント数をその割合で表示し、40% 以下の channel を赤色で表示した。図中の最右側列と最下行の channel は光電管壁に面している。この結果によると、光電管壁に近いピクセルほど効率低くなっていることが判った。この中で ch-23 はイベントの得られなかったため、0.08 ととても低い値となっている。

(g) 1 pixel が周囲 pixel へ与える cross talk

chip-D ch-22 の pixel 内で直径 1mm のライトスポットを 0.5mm のステップ間隔で照射したときの cross talk の様子を図 5.28 に示した。下図は他 pixel の影響を断面図によって示したものである。ただし、スポットの広がりや考慮していない。cross talk の影響は ch-22 からの影響が 44% 以上である。pixel 幅 4.9mm を越えても event 数がなだらかに変化し、影響が大きい。

(h) cross talk

各 channel の中央に同時間 LED 光を照射した時の図 5.29 に c は ch-22 への cross talk の様子を表している。

ヒストグラムの各 bin が chip-D 内の channel に対応し、縦軸は ch-22 のイベント数に対する割合 [%] で表示してある。bin と channel の対応関係は図中の channel

map に示してある。また、ross talk の割合を各 channel ごとに表示した。このときもスポットの広がりを考慮していない。この結果 ch-22 の隣接する channel からの cross talk は数% のものから 40% のものまで存在する。

5.2.2 考察

小有効面積の 3×3 channels HAPD では整形時定数による雑音への影響は表 5.6 より、正逆バイアス電圧を印加した場合の mean 値の変動率 P2 が負極性のものと比較すると 2 倍になっている。これは正極性のときに $N_\sigma = 3.4$ とゲインが得られなかったためと思われる。極性によってゲイン差があることに関しては、図 5.7 のコンデンサ C が機能していない可能性が考えられるが、詳しく調べていない。

今回開発された 144 channels HAPD において N_σ が 4.1 と 3×3 channels HAPD よりも低くなったのは、浜松ホトニクスデータのによると、APD の性能が規格目標よりも低くなっていることが原因と考えられる。規格目標では逆バイアス電圧 300V でゲイン 10 を得る APD ゲインが、今回のものでは同ゲインを取得するのに 360V 印加する必要がある。更に、光電陰極に -8kV 印加した時の電場加速による打ち込みゲインも目標 1400 であるのにたいし、1200 となっている。低ゲインのために N_σ は低くなり、 3×3 のものよりも 40% と悪くなっていると考えられる。

読み出し回路が与える雑音を調べるために、整形時定数を $0.5 \sim 2.0 \mu\text{s}$ の間で変化させ、その時の 1 光電子分布を調べた。その結果、 3×3 、144 とともに $T_M = 0.5 \mu\text{s}$ のときが最も波高分布がシャープになり、波高分布の mean (μ) 値が大きく、シグナル分離度 N_σ が最も大きくなることが判った。整形時定数を変化させたときに μ が 1 次関数に従って小さくなると仮定した場合、fitting パラメータ P2 は μ 変動率を表す。測定の際に設定した電圧や APD の状態などにより HAPD のゲインがそれぞれ異なるため、整形時定数が波高分布の μ にどの程度の影響を与えるかを調べるには、ゲインを考慮に入れなければならない。変動率はゲインと関係している。負逆バイアス電圧印加時において 3×3 と 144 を比較した場合低ゲインの 144 channels HAPD ほど変動率は大きくなり、 μ 値に影響し易い。また、すべての雑音を読み出し回路の増幅における等価雑音電子数のみで決まると仮定し、雑音 (ここでは波高分布の FWHM を示す) を式 5.1 による fitting で α 、 β 、 γ を導出した。これによって求められる雑音を最小にする整形時定数 T_M^{\min} は表 5.11 にまとめた。これによる

	HAPD	逆バイアス電圧極性	T_M^{\min}	Unit
1.	3×3 channel	負	0.46	
2.	3×3 channel	正	0.60	μs
3.	144 channel	負	0.38	

表 5.11: 雑音を最小にする整形時定数 T_M^{\min}

と表中の 1. 及び 3. で雑音は整形時定数 $T_M < 0.5 \mu\text{s}$ で最小になる。今回の測定に使った整形増幅器における可変整形時定数は $0.5 \mu\text{s}$ よりも小さく設定することができないが、より小さい整形時定数で雑音が最も小さくなる可能性がある。従って、今後の HAPD 読み出し回路の設計において $0.5 \mu\text{s}$ よりも小さい整形時定数を考慮することがより低雑音で信号取

得するために必要であると考えられる。ただし、表中の 2. は低ゲインになる原因を理解していないため考慮していない。

A-RICH 検出器では Cherenkov 光は入射窓に対して、入射角がある。今回の結果では入射位置、入射角によらずシグナル分離度 N_s は一定であった。144 channels HAPD の低ゲインによる分離度への影響はないと判断できる。

144 channels HAPD のマルチアノード特性として各 channel のばらつきを調べたところ、1APD 内のピクセルではどのピクセルにおいても、信号読み出し配線の長さの影響以外は見られないと思われる。ただ、原因を調べていないが ch-23 は信号がまったく得られなかった。今後は、この原因を解明しなければならない。また、各ピクセルの検出能力を示すシグナル分離度は図 5.27 に見られるようにばらつきがあった。この図から APD 内におけるほとんどのピクセルで N_s は 2 より大きい。そのため現在の HAPD のシグナルに関する性能はシグナル分離度の観点から $N_s > 2.0$ であるといえる。シグナル分離度のばらつき、HAPD の性能として $N_s > 2$ が適当であるかどうかは配線の長さによる雑音の影響を考慮しなければならない。

効率は光電管壁に近いピクセルほど効率は悪くなっていた。これに対して、光電管内の電場や光電面の不均一性が考えられる。

cross talk 特性においては Target channel の周囲 channel からの 40% の影響をもつ pixel がある。浜松ホトニクス cross talk データ (付録 A 参照) によると 1 pixel が周囲のピクセルに与える cross talk は 10% 未満である。このため、今回の測定においてスポットの広がりを無視することはできない。図 5.30 は cross talk 結果からスポットの広がりを導出するものである。ch-22 の周囲で 10% 以上の cross talk があるピクセルでは、そのピクセルの中心に光を照射していても LED 光は直に ch-22 へ光子が入っていると仮定する。このときのスポットは、ch-22 の中心から最も遠いピクセル内の最短、長距離をスポット広がり $\delta\theta$ の範囲と定義すると、 $\delta\theta$ はおよそ

$$0.0817\text{rad} < \delta\theta < 0.146\text{rad}$$

程度あることになる。ピクセルサイズは 4.9mm である。従ってピクセルの中心に光を照射したとき照射光すべてが同一ピクセル内に入るためにはスポットの広がりは $\delta\theta < 0.025\text{rad}$ でなければならない。したがって今後スポットの広がりを如何に抑えられるかが課題となる。この対処法としては次の 3 つが考えられる。

1. 光源を近づける

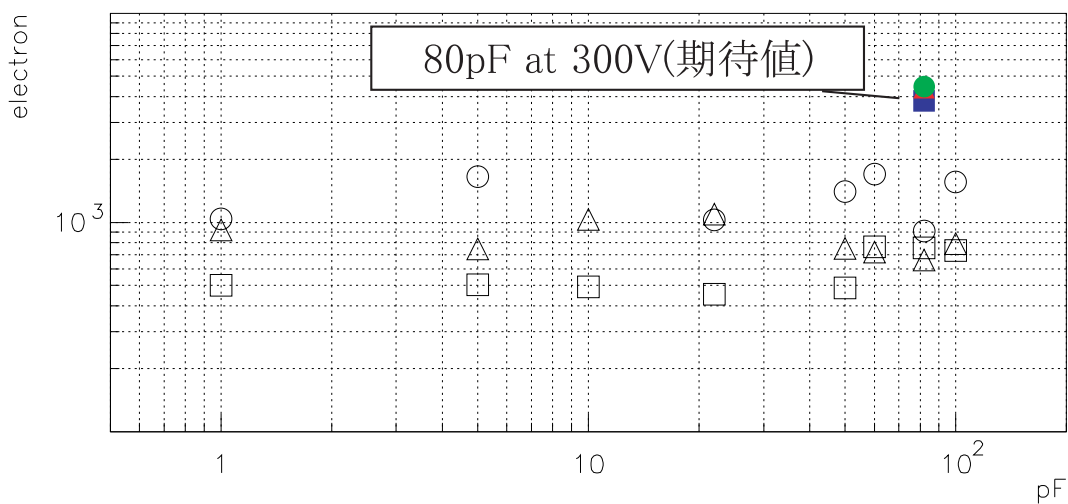
現在の光源のスポットの設定変えず、光源を近づけることでスポットの広がりを抑える。測定では最大 $\delta\theta \sim 0.146\text{rad}$ 広がりがあるとすると、光電面とスポットまでの距離 l を $l < 17\text{mm}$ に設定する。

2. 光ファイバによる照射

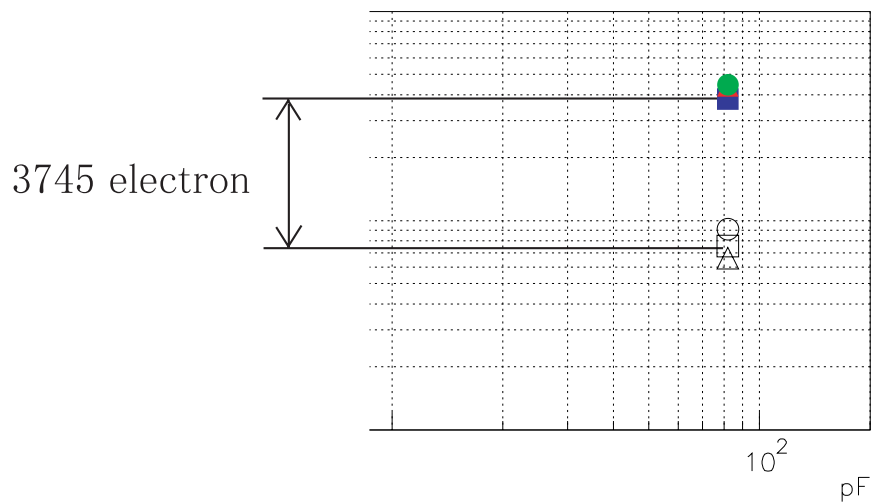
光源から光を光ファイバを經由して光検出器に照射する。ファイバのコア径はおよそ $50\mu\text{m}$ 程であり、照射口を近づけることでスポットの広がりは 1. よりも抑えることが可能と思われる。

3. マイクロレンズによる集光

光をマイクロレンズによって集光する。シグマ光機株式会社製のマイクロレンズでは最小の直径で $\phi 2\text{mm}$ ($f=1.5\text{mm}$) である。



144 channels HAPDと前置増幅器 (CLEAR-PULSE,580K,4032)の雑音



$T_M = 0.5 \mu s$ のHAPDと環境を含めた雑音

図 5.16: 144 channels HAPD の雑音評価 (CLEAR-PULSE580K,4032 使用時)

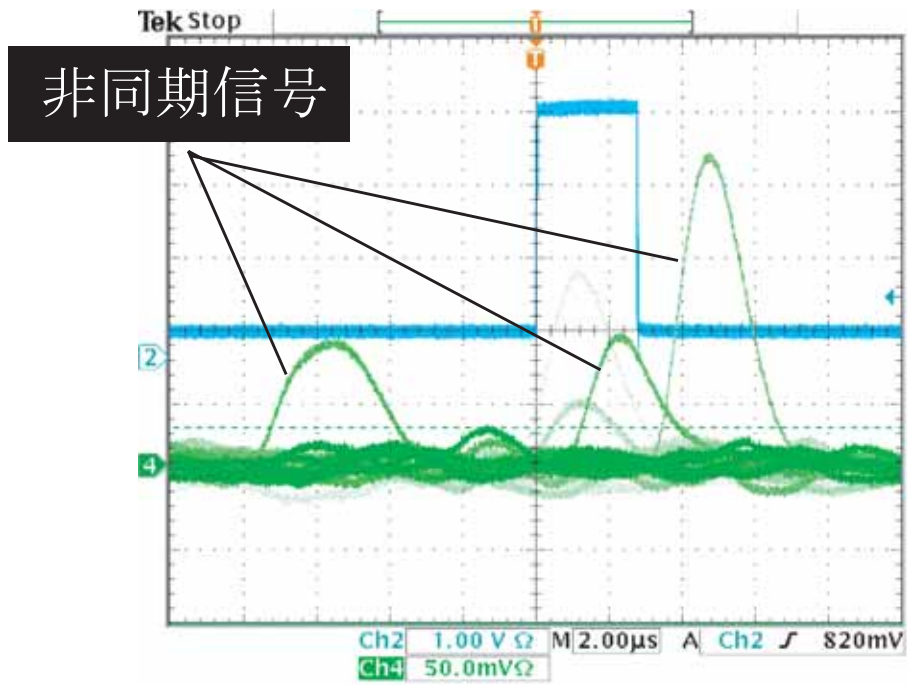


図 5.17: オシロスコープでの photon response 観測 1 : 144 channels HAPD chip-D の dead channel に電圧を印加した場合

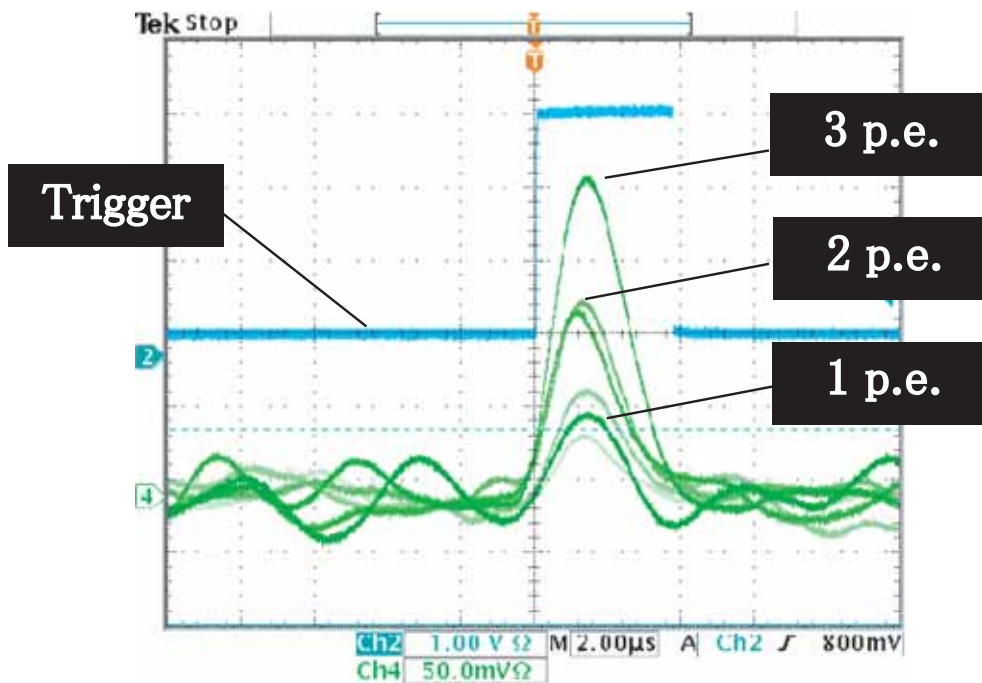


図 5.18: オシロスコープでの photon response 観測 2 : 144 channels HAPD chip-D の dead channel を除いて電圧を印加した場合

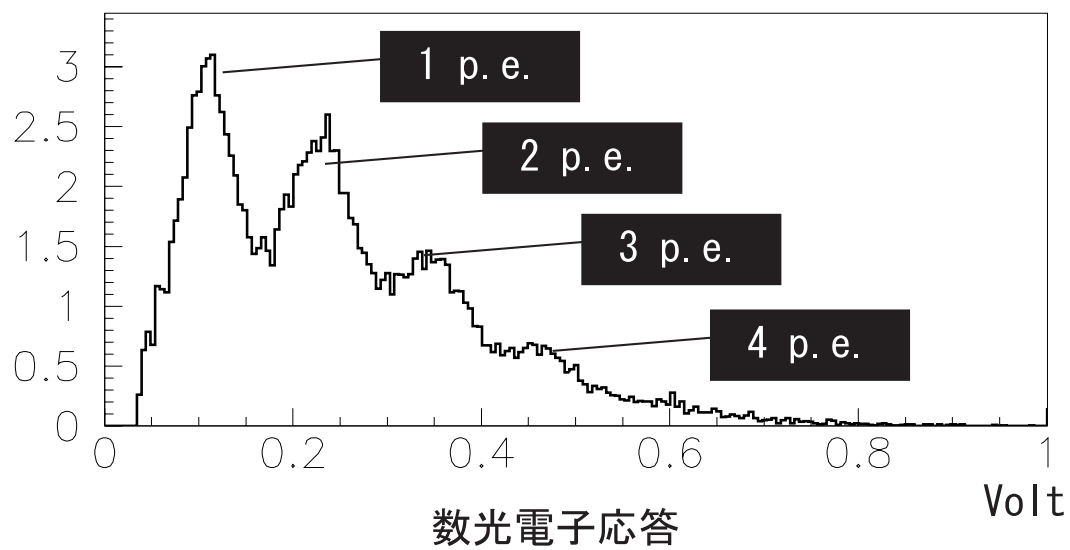
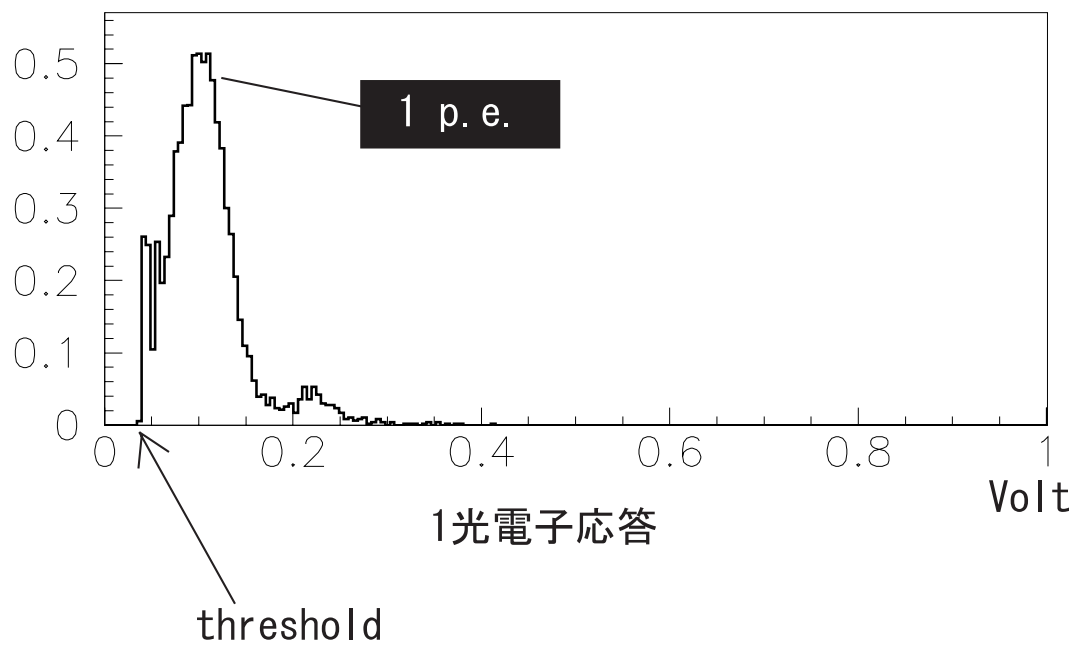


図 5.19: 144 channels HAPD chip-D ch-22 のシグナル:LED により single, multi-photon 照射、分布は pedestal の平均を 0 に合わせ、threshold 電圧のイベントで規格化した後 pedestal を引いて表示

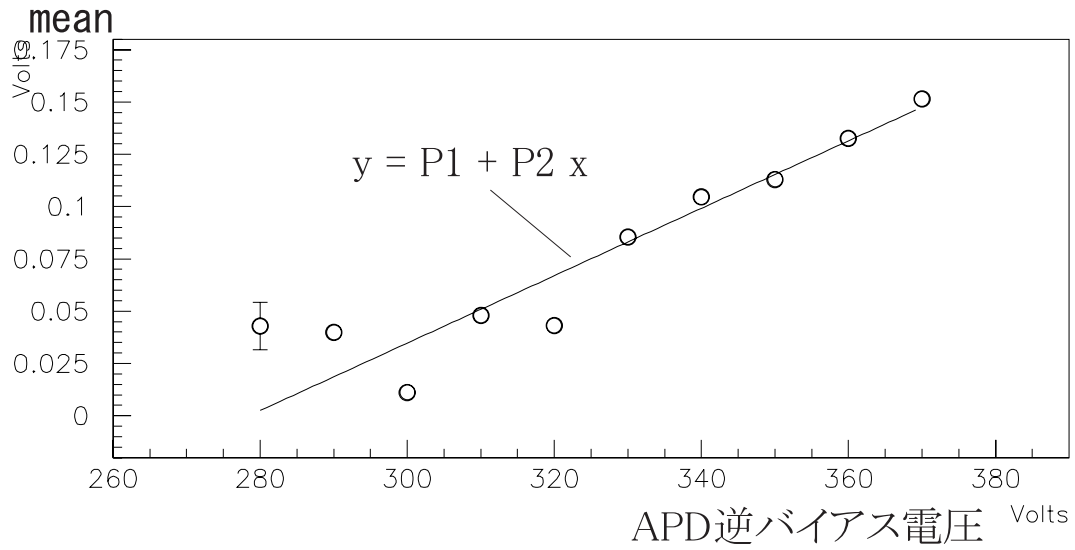


図 5.20: APD 逆バイアス電圧による 1 光電子波高分布への影響

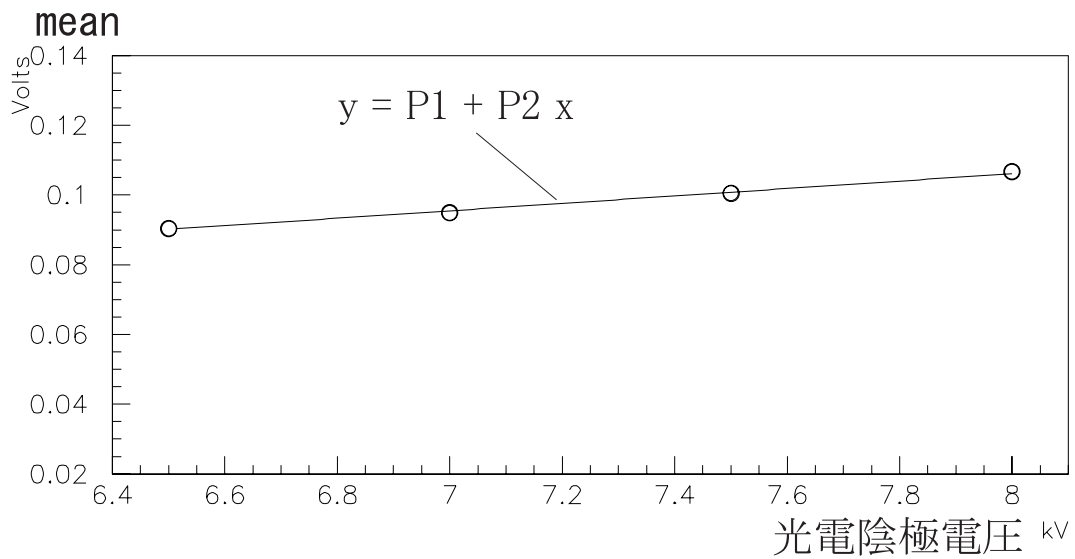


図 5.21: 光電陰極印加電圧による 1 光電子波高分布への影響

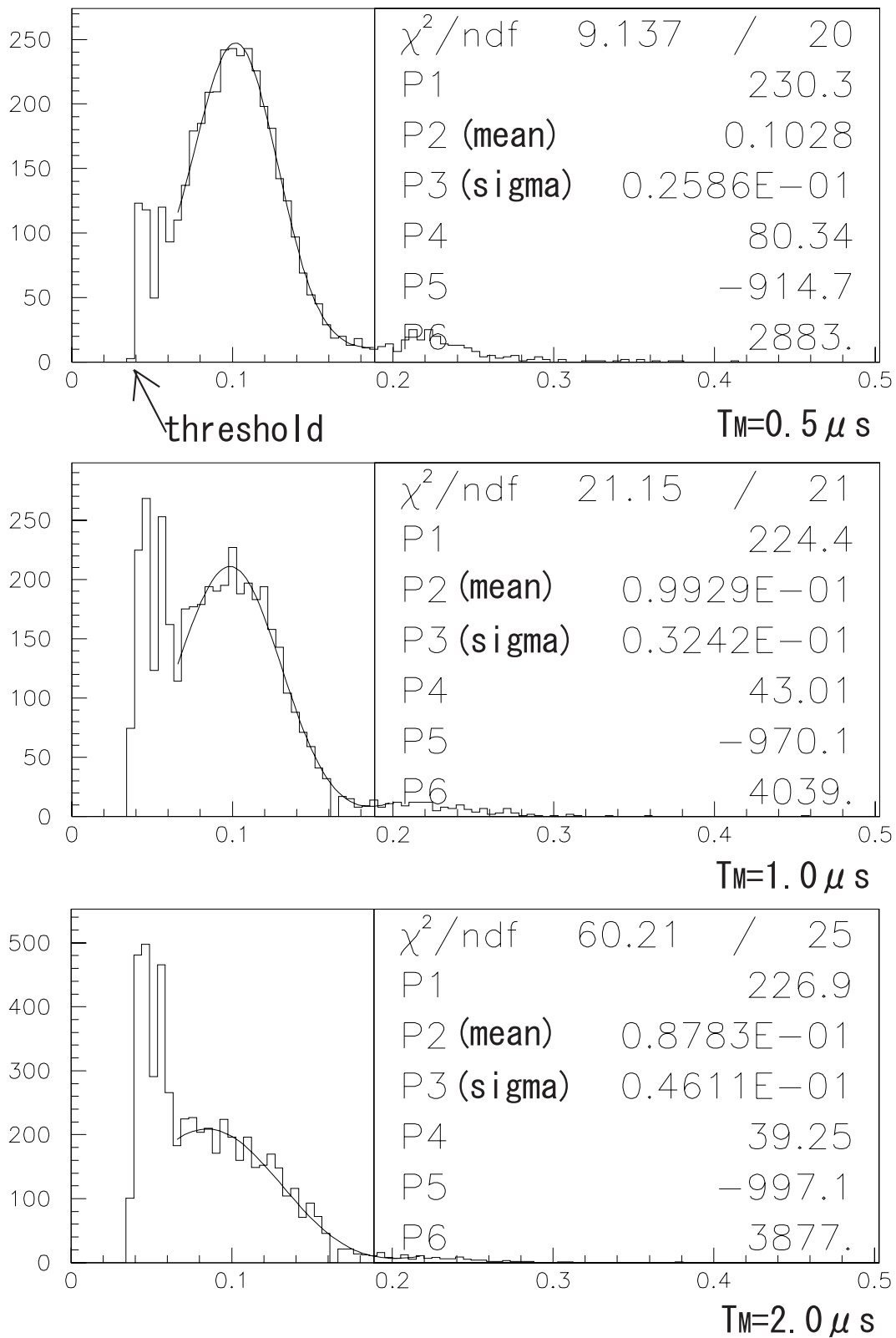


図 5.22: 144 channels HAPD chip-D ch-22 における 1 光電子波高分布の整形時定数依存性、分布は pedestal の平均を 0 に合わせ、それぞれ threshold 電圧のイベントで規格化した後 pedestal を引いて表示

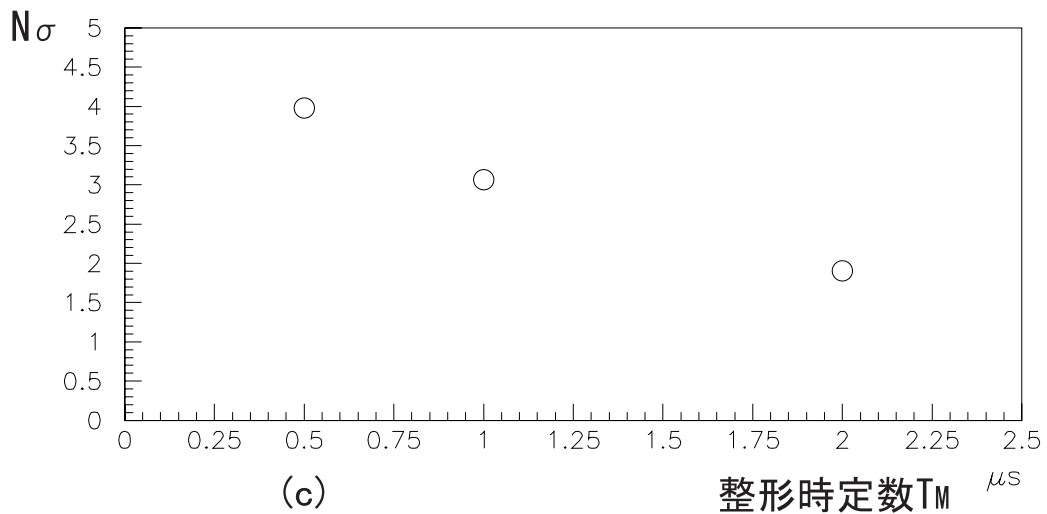
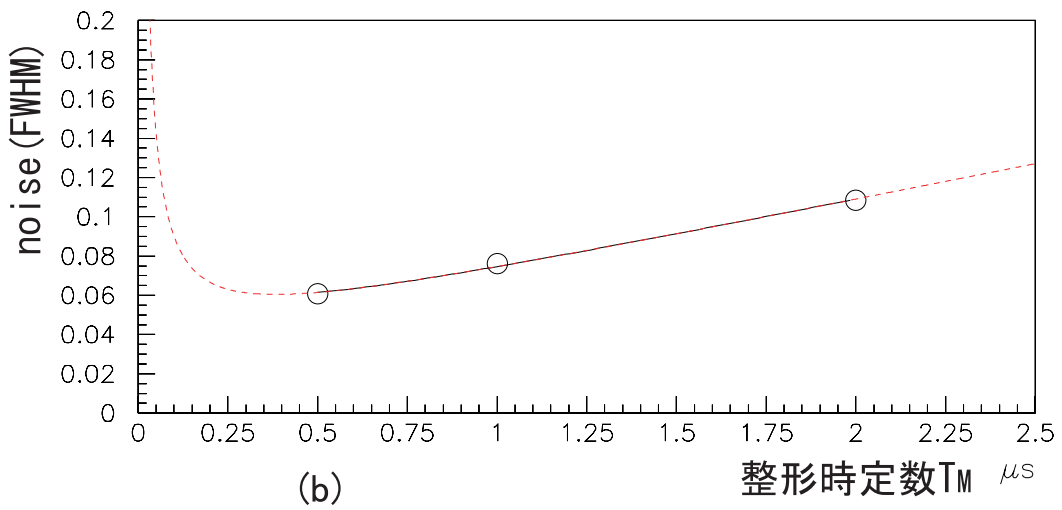
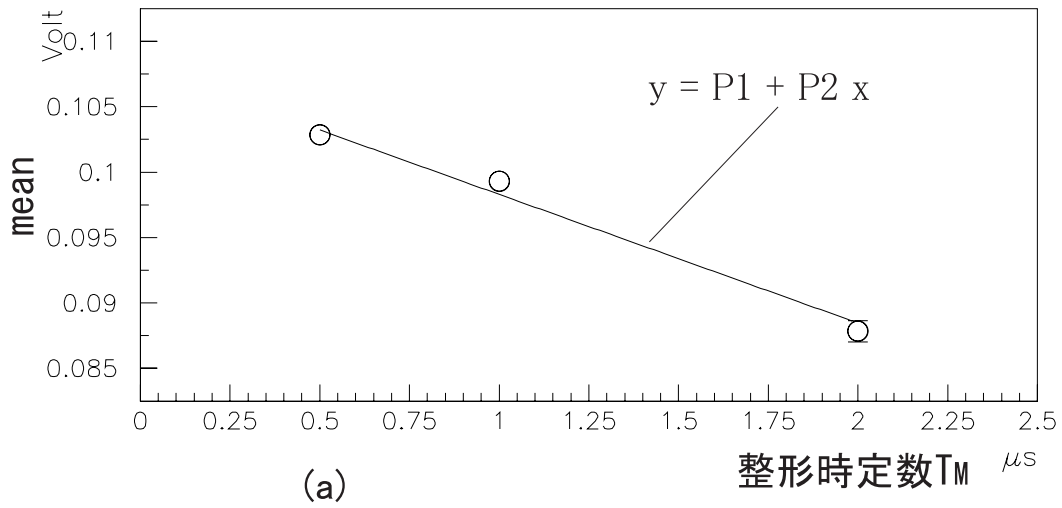


図 5.23: 144 channels HAPD chip-D ch-22 における single photon 波高分布の整形時定数依存、 T_M による mean 及び noise、 N_σ の違いを表示

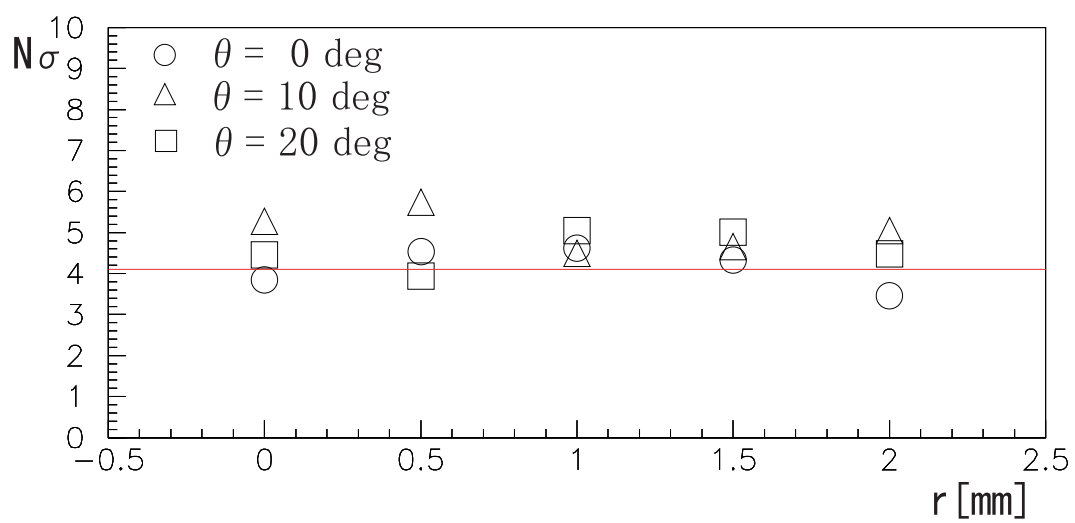


図 5.24: 144 channels HAPD chip-D ch-22 における入射位置及び入射角度を変えたときのシグナル分離度 N_σ の様子、ラインは $N_\sigma = 4.1$ を表す

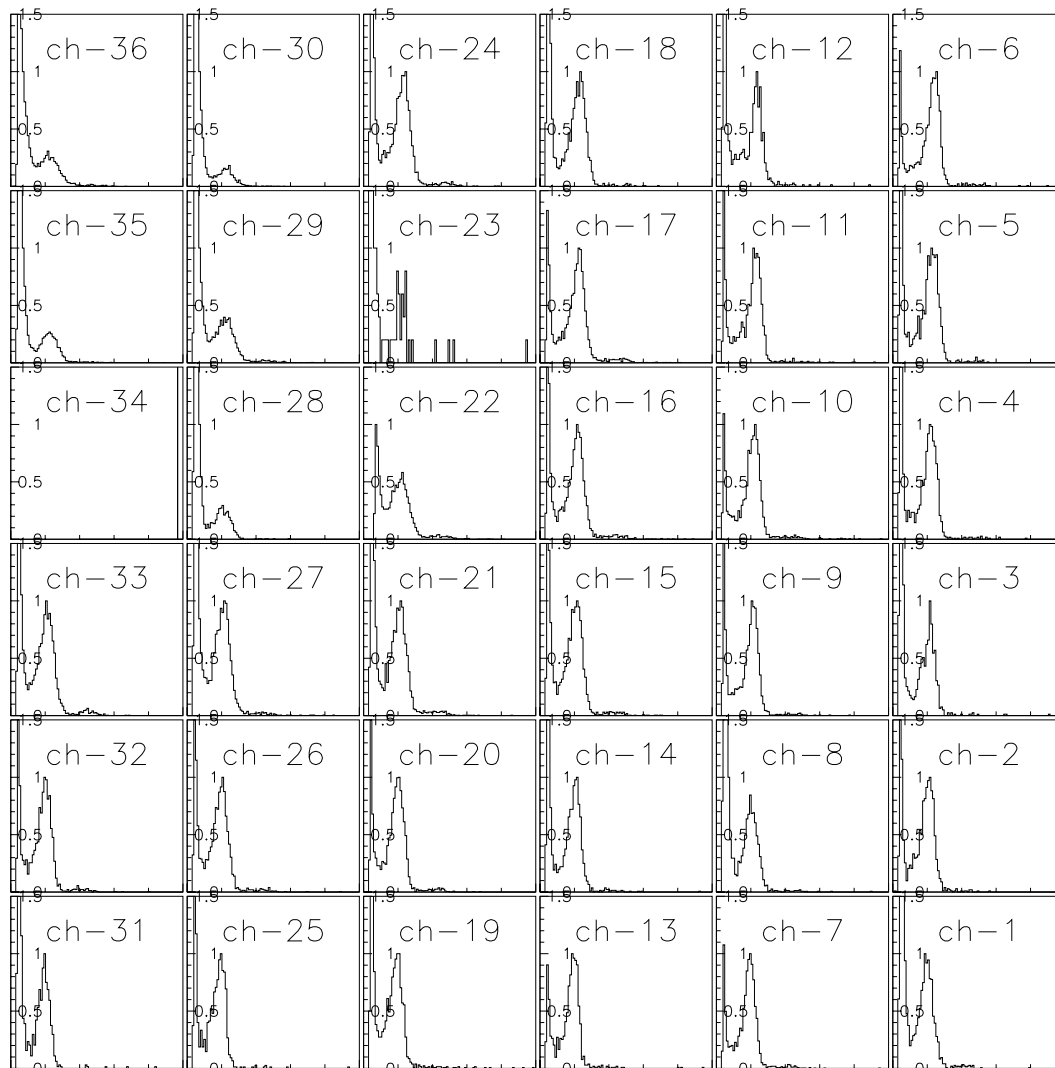



図 5.25: 144 channels HAPD chip-D における各 channel から取得された波高分布、全ての channel のイベントを規格化して表示

1	0.299	0.796	0.464	0.165	0.352
0.454	1	0.008	0.911	0.421	0.394
	0.239	1.344	0.932	0.551	0.338
0.915	0.673	0.9	0.742	0.449	0.19
0.704	0.607	0.748	0.366	0.379	0.305
0.143	0.215	0.398	0.274	0.69	0.474

36	30	24	18	12	6
35	29	23	17	11	5
34	28	22	16	10	4
33	27	21	15	9	3
32	26	20	14	8	2
31	25	19	13	7	1

chip-Dのchannel配置

 ... 光電管壁に接する
 ピクセル

各channel イベント数の割合

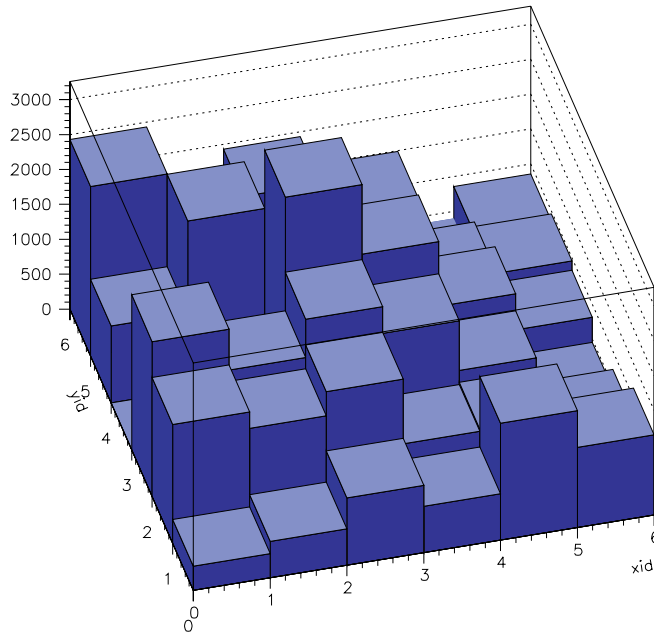


図 5.26: 144 channels HAPD chip-D における効率、threshold 電圧以上のイベントを数え、ch-36 のイベント数に対する割合で示したもの

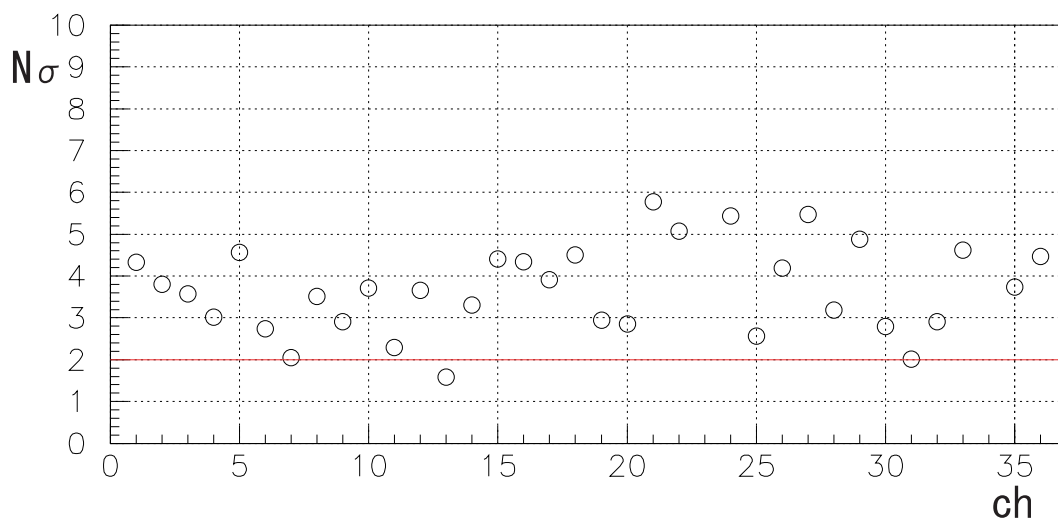
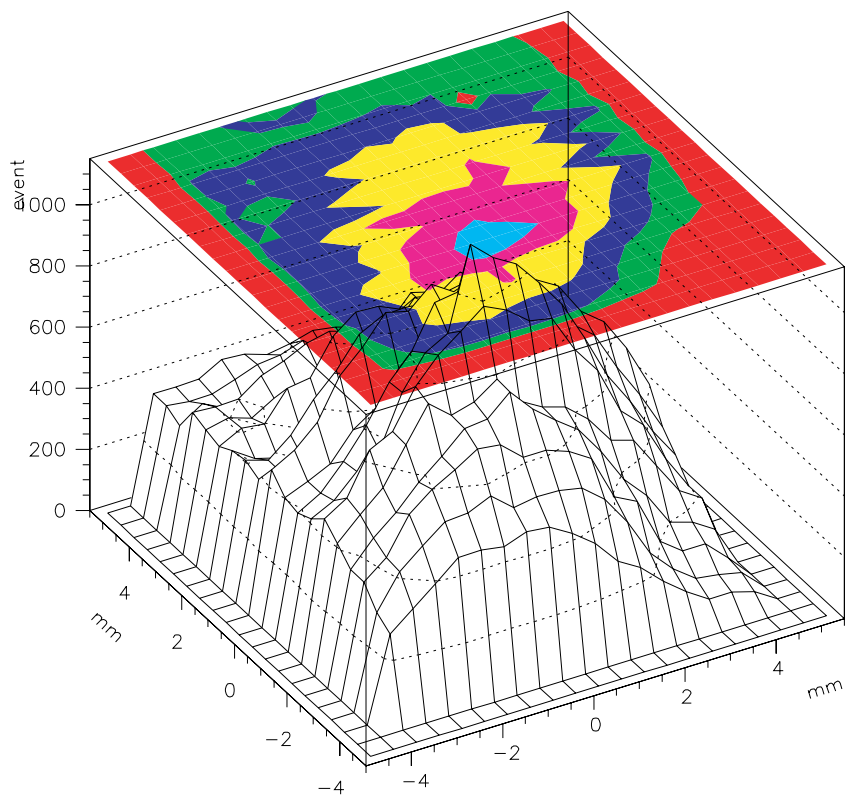
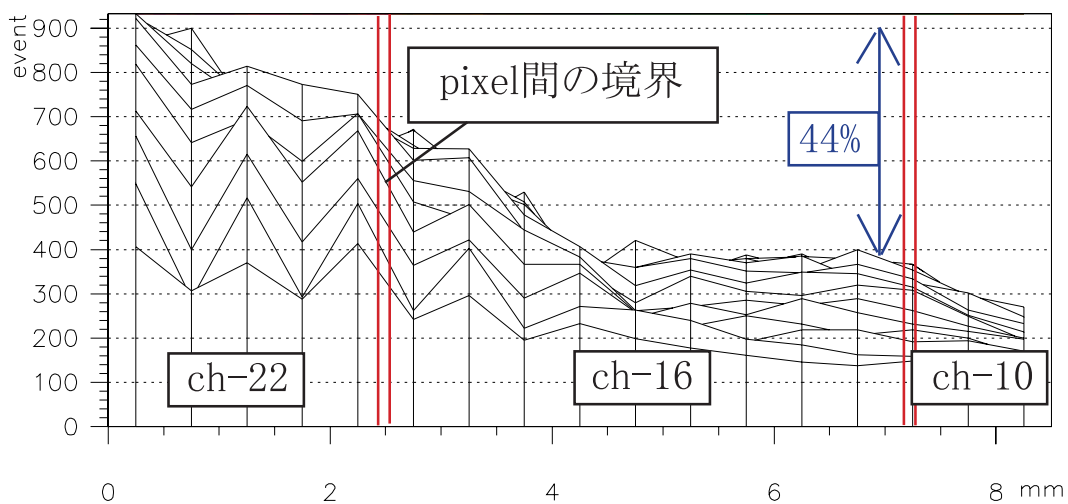


図 5.27: 144 channels HAPD chip-D におけるシグナル分解能 N_σ 、イベント数の得られなかった ch-23 を除いて表示



1pixel(4.9×4.9 mm)のcross talk



1pixelが隣接ピクセルへ与える影響

図 5.28: 1 pixel 内の cross talk: 144 channels HAPD chip-D ch-22 の pixel 内で直径 1mm のライトスポットを $500\mu\text{m}$ 間隔で照射したときの波高分布図

3.78	5.14	11.62	8.38	7.03	2.97
4.86	15.41	31.89	36.22	12.16	5.14
2.16	19.19	100	43.78	14.32	3.24
1.08	2.97	14.05	15.95	6.76	3.51
2.43	3.24	5.95	10.54	3.78	3.78
1.62	3.51	2.16	5.68	3.24	2.7

36	30	24	18	12	6
35	29	23	17	11	5
34	28	22	16	10	4
33	27	21	15	9	3
32	26	20	14	8	2
31	25	19	13	7	1

chip-Dのchannel配置

■ ……10%以上影響のあるピクセル

ch-22に対する割合

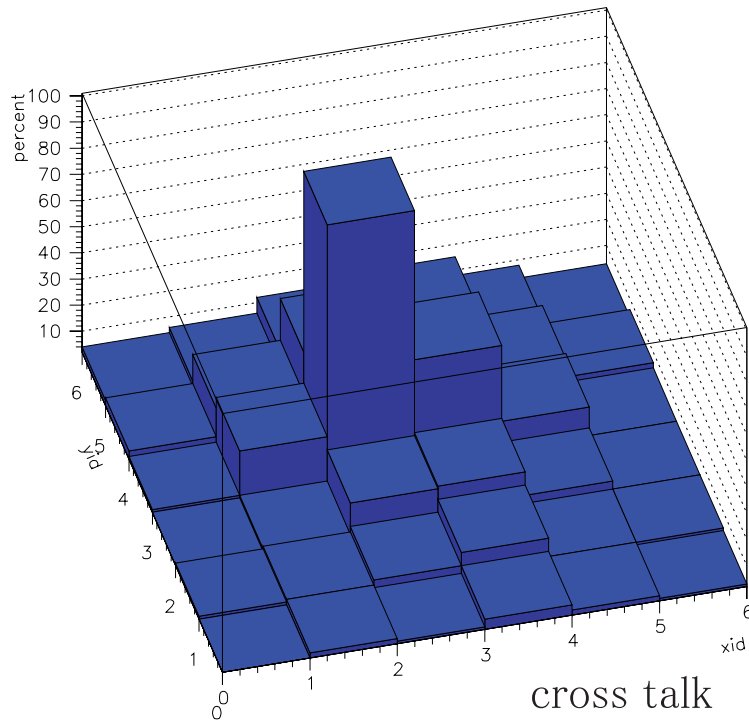


図 5.29: 144 channels HAPD chip-D の ch-22 への cross talk: Target channel のイベント数を 100% とし各 channel の影響度、10% 以上の影響度をもつ channel をグレーで表示

3.78	5.14	11.62	8.38	7.03	2.97
4.86	15.41	31.89	36.22	12.16	5.14
2.16	19.19	100	43.78	14.32	3.24
1.08	2.97	14.05	15.95	6.76	3.51
2.43	3.24	5.95	10.54	3.78	3.78
1.62	3.51	2.16	5.68	3.24	2.7

スポットの広がり

光源の中心

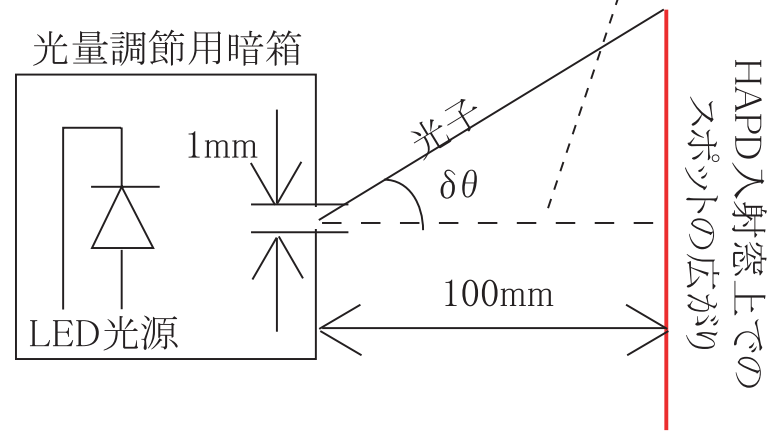


図 5.30: ライトスポットの広がり考察

第6章 結論

Belle 検出器の能力向上において、 K/π 中間子識別を担う副検出器グループのうち ACC グループでは、Belle 検出器 Endcap 部の検出器をより広範囲の運動量領域の粒子を識別対象にする A-RICH 検出器の研究開発を行っている。本研究の目的は、RICH 検出器に採用する予定の光検出器の性能評価である。現在、この A-RICH 用光検出器として採用予定されている新型マルチアノード型光検出器 144 channels HAPD を ACC グループと浜松ホトニクス株式会社の共同によって開発しており、HAPD は浜松ホトニクスにて試作中である。今回、その完成された HAPD に対して性能評価を行った。

6.1 Compact RICH 検出器について

HAPD の A-RICH 用光検出器としての効果を調べるためのシステムを考案した。限られた有効範囲の光検出器で Cherenkov リングを観測するためには Cherenkov 光を集光しなければならない。輻射体中から放出される Cherenkov 光の放出点不特定性を考慮した結果、レンズを利用したシステムが有効であることが判った。この Compact RICH 検出器では図 4.4 のシミュレーション結果により輻射体から放出された Cherenkov 光は光検出器上の一定位置に入射することが判った。また、この Compact RICH 検出器の評価を Beam test によって行い、リングを観測することができた。実験結果の 1 次元角度分布の mean 値はシミュレーションの値と比較した結果、良く一致し、Compact RICH 検出器の稼働を確認できた。

しかし、現在の Cherenkov 光放射角の再構成方法を Compact RICH 検出器に導入した場合、角度を Cherenkov 角として正しく算出していない。このため、Compact RICH 検出器を A-RICH 検出器として評価するまでには至っていない。

今後、Compact RICH 検出器において如何に Cherenkov 角を導出するかが課題である。

6.2 HAPD について

昨年度の研究では小有効面積の 3×3 channels HAPD の性能評価が行われ、負の逆バイアス電圧印加時に single photon に対する波高分布測定が行われた。そのときの測定では負逆バイアス電圧でシグナル分離度は $N_s = 3.5$ であった。今回の測定で、同様の HAPD を用いたときに $N_s = 7.7$ とすることができた。これは周囲からの雑音をできる限り小さく抑えられたためと考えられる。読み出し回路で雑音を拾っていた箇所は図 5.7 の HAPD の信号を前置増幅器に入力するために用いた同軸ケーブルである。このケーブルを短くし、HAPD の anode ピンと前置増幅器入力端子を可能な限り近づけ、雑音を抑えられたことが起因していると考えられる。

また、今回初めてとなった大有効面積の 144 channels HAPD の性能評価において photon 応答を得られたことは大きい。低雑音の HAPD の single photon に対する信号が CLEAR PULSE 社製や、ORTEC 社製の一般の増幅器の読み出し回路の雑音に紛れることなく取得することができた。今回の測定に使った 144 channels HAPD と周囲の環境による雑音は 3745electron であった。今後開発されてくる HAPD がこの値に一定であるとすると、整形時定数 $T_M = 0.5\mu s$ において $N_\sigma = 4.1$ の精度で信号取得できる。

しかし、single photon のシグナル分離度は $N_\sigma = 4.1$ と 3×3 の分離度に比べ 53.2% と低い。これは 144 channels HAPD の低ゲイン、特に APD の質に起因しているものと考えられる。浜松ホトニクスとの調査によると、この APD の低ゲインは開発過程で APD を真空管に設置するとき、読み出し配線に何らかの影響を与えてしまっているということが判ってきた。今後の測定では、今回の測定によって測定の要領をつかむことができたため、より高い分離度実現を目標にする。

測定につかった 144 channels HAPD の諸特性についてまとめると、表 6.1 のようになる。今回の測定によってスポットの広がりには注意せねばならない教訓を受けた。ライトスポットの光電面までの距離を短く設定し光の広がらないうちに HAPD の pixel に光子を入射するか、あるいはマイクロレンズを用いて LED 光を集光させることによって広がりを抑える方法をとって今後の測定につなげたい。

測定項目		評価
photon 応答		single photon の分離度 $N_\sigma = 4$.
整形時定数		$T_M = 0.5\mu s$ のときもとても低雑音
入射位置 角度の分離度		N_σ に影響はない
cross talk		スポットの広がりを考慮すべき 他 channel の影響：40% cf. HPK によると 10% 未満
各ピクセル特性	効率	光電管壁側の pixel ほど効率は低い
	波高分布	ほとんどのピクセルにおいて $N_\sigma > 2.0$ ch-23 はイベント少

表 6.1: 測定項目のまとめと評価

6.3 A-RICH 検出器について

A-RICH 検出器にとって、144 channels HAPD での single photon シグナルの取得は今後光検出器部における研究を進める上で重要となる。大有効面積の HAPD はそれまで開発過程の問題によって雑音が大きく、1 channel における信号取得は困難であった。現状では APD の低ゲインのため、シグナル分解能は 3×3 のものよりも悪くなっている。今回測定に使った HAPD でどこまで分解能をあげられるかは測定方法の改良にかかっている。

A-RICH 用光検出器として今後研究を進めていかなければならないことはマルチアノード型としての全 channel 同時読み出しである。現在、A-RICH 検出器で HAPD を読み出す増幅回路として ASIC (Application Specific Integrated Circuit) を開発中である。この研究は昨年度の関 貴之氏の修士論文で発表されている。この ASIC は HAPD 直後の前置増幅器である。ハイ・イベントレートに対応した信号処理機能を持ち、dead time をなくすることができる。電荷有感型前置増幅器、整形増幅器、可変利得増幅器の増幅回路部を備え、信号処理回路部ではデータを効率よく収集することを目的にビット化処理を施すコンパレータ回路を内蔵している。ASIC は、VDEC (VLSI Design and Education Center) に依頼し、昨年度に試作機 S01 が開発された。また S01 で問題視されていた、ASIC における channel 間のオフセットのばらつき、アナログモニター出力用バッファ回路への電流供給量不足、雑音などの問題を改善させた S02 が開発されている。しかし HAPD と ASIC の両者の雑音の大きさの問題から HAPD 全 channel 同時読み出しまでには至っていない。今後、S02 の雑音を制御し HAPD を含めた測定を行う予定である。また、S01 での問題を含め、整形時定数の下限を引き下げた S03 が現在開発中である。今後の HAPD と ASIC の進展が期待される。

6.4 今後の課題

HAPD の今後の課題として、以下の 5 つが挙げられる。

1. Compact RICH 検出器

Compact RICH 検出器の解析方法において現状では Cherenkov 角としての導出が出来ていない。A-RICH 検出器として機能するには放射角度として角度を再考することが必須である。

2. photon 応答

測定方法の改善によって大有効面積の HAPD で N_{σ} をどれだけ高められるかが読み出し回路の雑音の制御に重要な要素。今回の測定では雑音を読み出し回路の増幅部分のみに依存するとして解析を行った。測定に用いるその他の回路部分、周囲環境にも着目し、雑音源を特定することが N_{σ} を上げることに重要。

また、今回の測定では信号のタイミング測定を行っていない。そこで今後の測定では時間と電圧を同時に測定し、信号として再現性のあるデータ取得を試みる。

同様の測定を APD 逆バイアス電圧の極性を変えて行う。

3. マルチアノード型としての諸特性評価

今回の測定に改良点 (例 : スポットの広がりを抑える) を加え、マルチアノード型としての諸特性 APD の各ピクセルのばらつき、cross talk、ピクセル間の dead area 測定、光電管壁面のピクセルとその周囲との違い、各種 uniformity を調べることが必要である。この諸特性を評価するにあたり、AC (パルス) または DC を光源に入力することで得られる HAPD の出力がどう異なるかも調べる。また、HAPD に内蔵されたピクセルの読み出し配線の長さを考慮に入れた解析が必要。

4. 全チャンネル同時読み出し

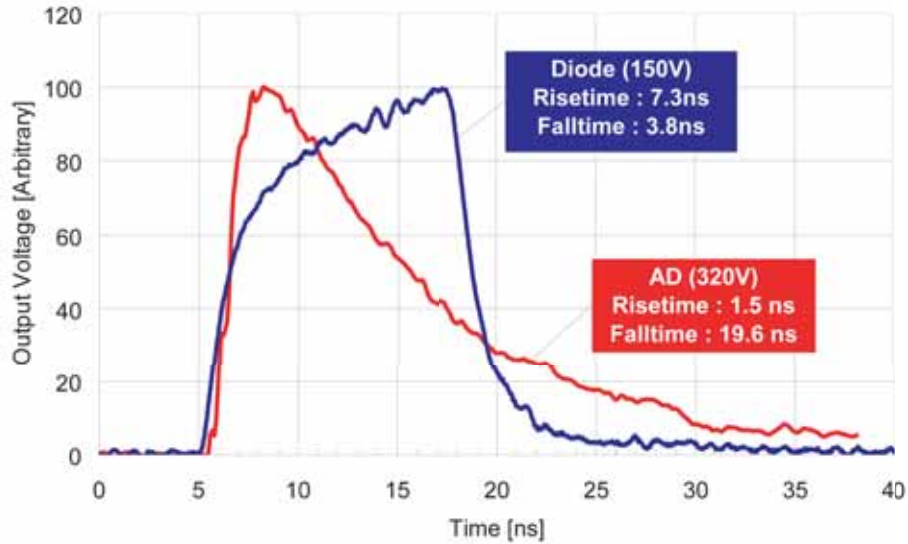
ASIC による 144 channels HAPD の全 channel 同時読み出し。ASIC、HAPD それぞれの雑音制御が課題となる。

5. Beam Test

テストビームを使用した Beam Test 実験は HAPD の A-RICH 検出器としての性能を調べる上で必須課題。

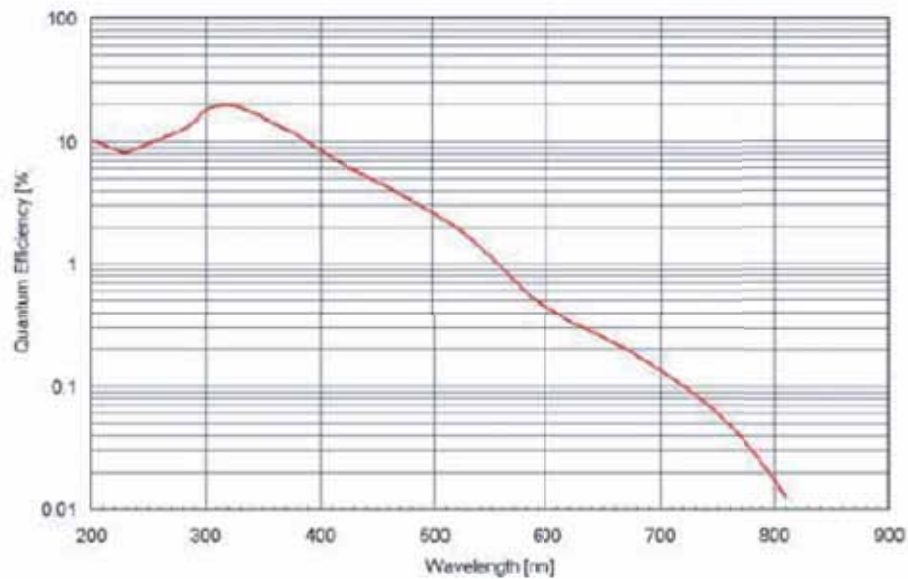
付録A 144 channels HAPDデータ (提供:浜松ホトニクス)

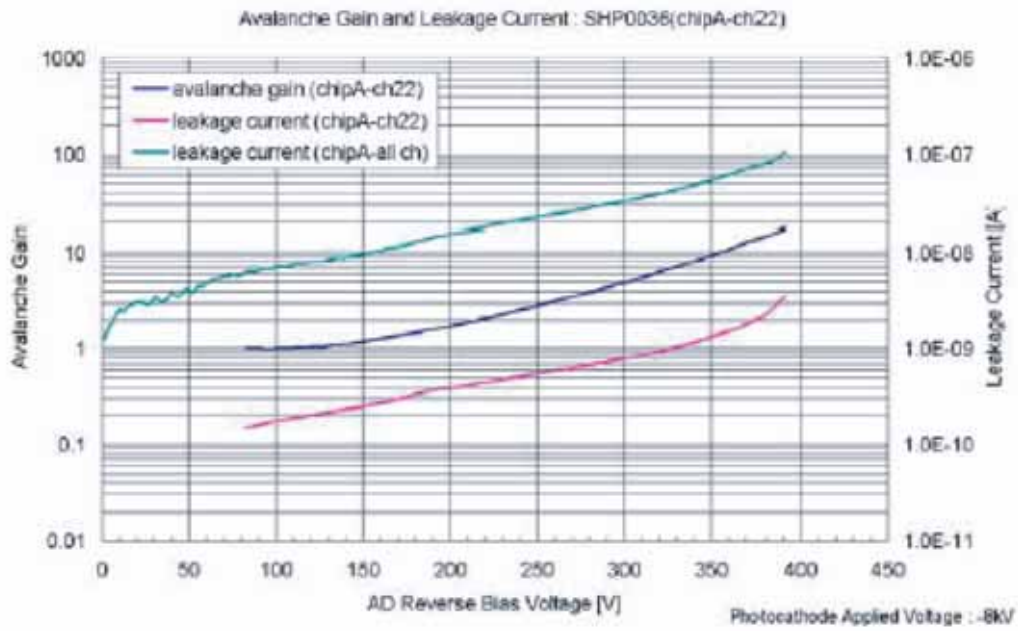
時間応答



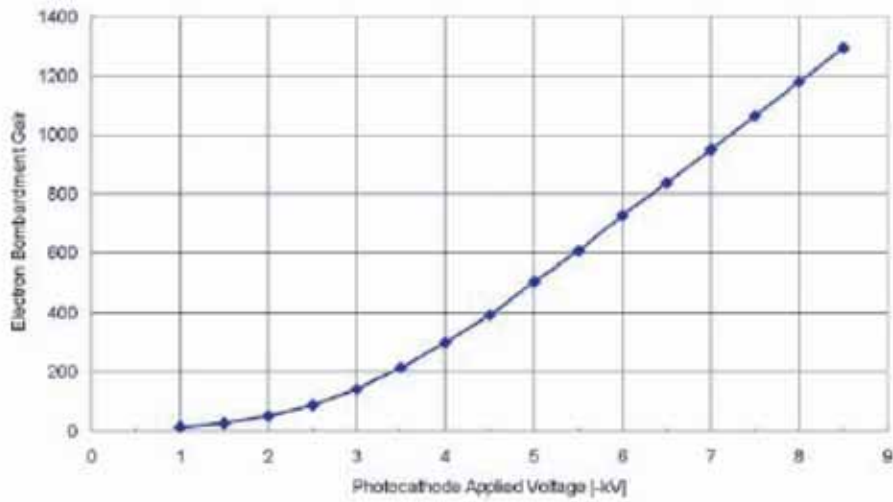
☆ 光電面量子効率

光電面印加電圧 -1500V





Avalanche ゲイン



電子打ち込みゲイン

測定条件

波長: 400nm, スポットサイズ: $\phi 0.2\text{mm}$

加速電圧: -8kV, AD バイアス電圧: +385V, ガード電圧: +200V

電子照射ゲイン1700, アバランシェゲイン15

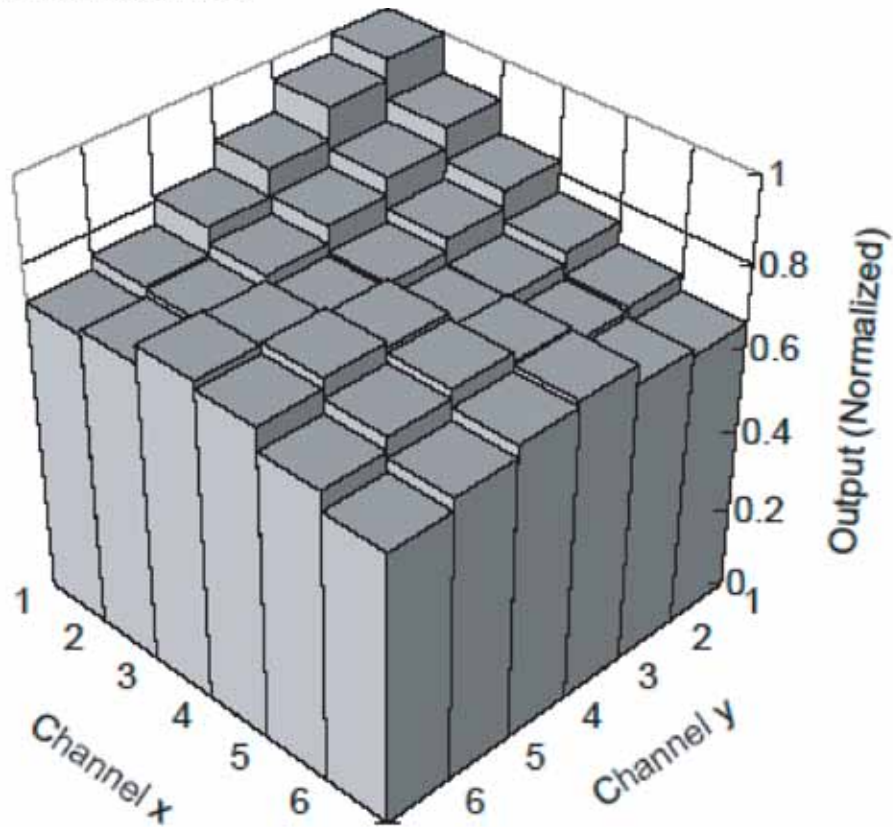


図1: 光電面のユニフォミティー(SHP036、チップ A)

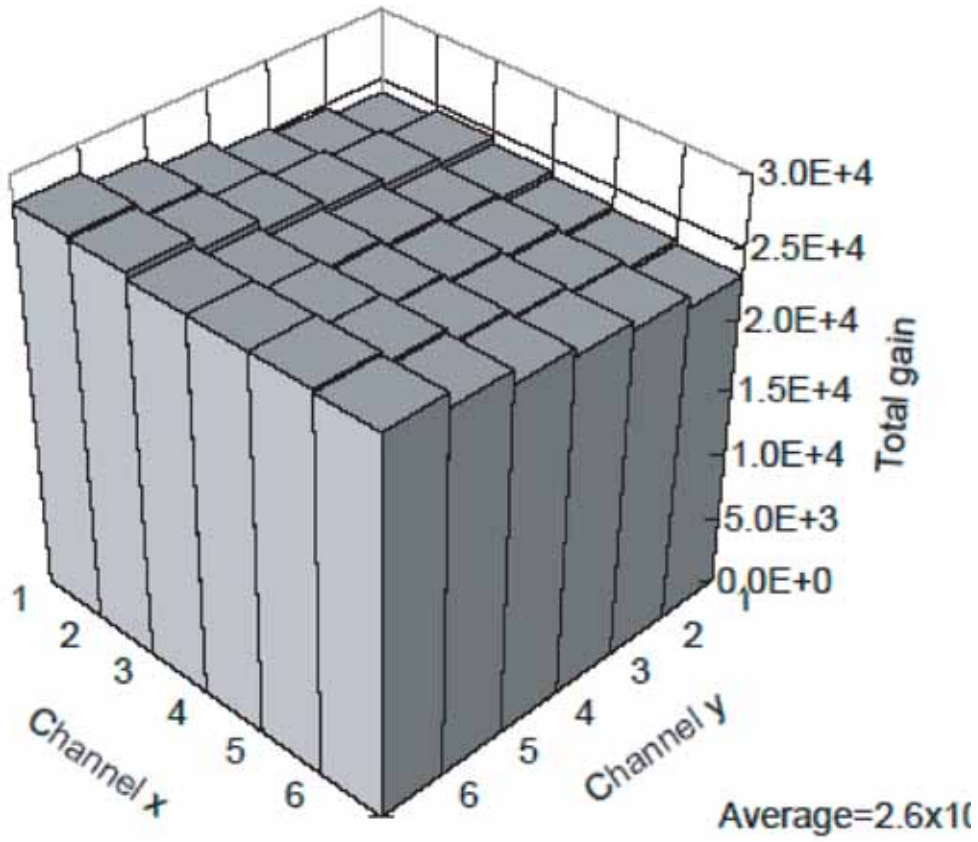
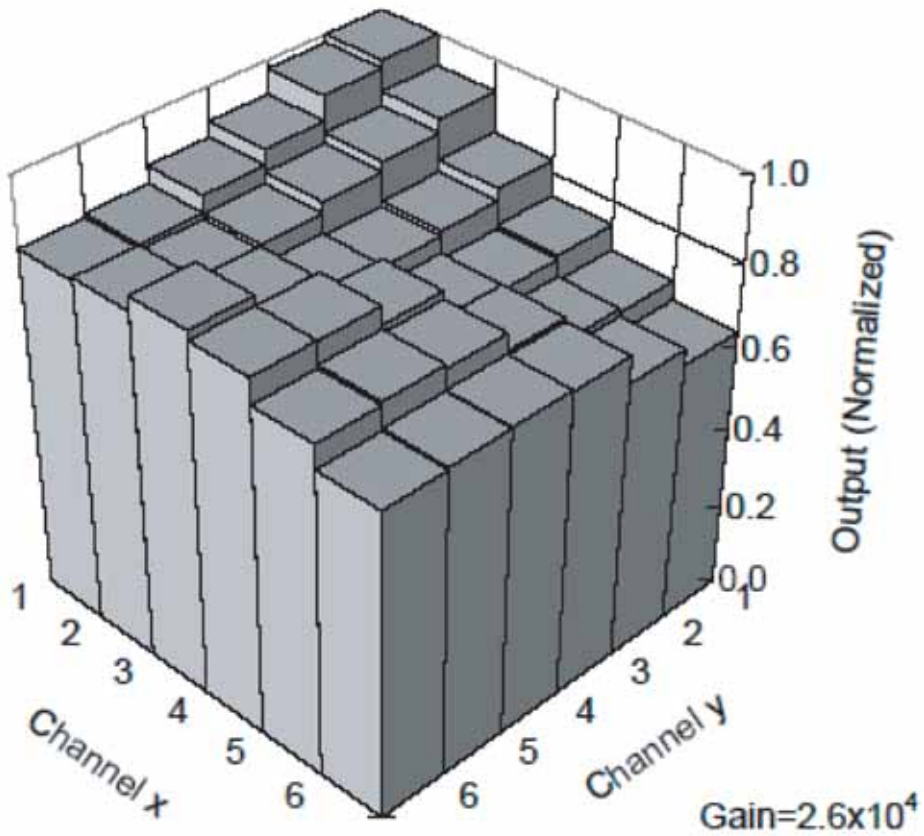


図2: トータルゲインのユニフォミティー(SHP036、チップ A)

図3: HPD としてのユニフォミティー(SHP036、チップ A)



測定条件

波長: 400nm, スポットサイズ: 0.2mm, スキャンピッチ: 0.2mm
加速電圧: -8kV, AD バイアス電圧: +385V, ガード電圧: +200V
電子照射ゲイン1700、アバランシェゲイン15

図4: チップ A、ch1(角)の出力(クロストークを示す)

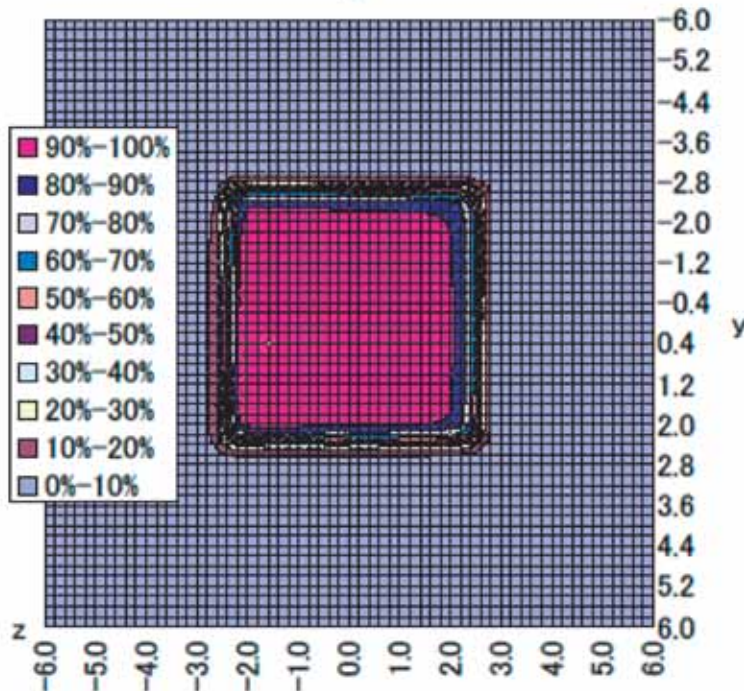
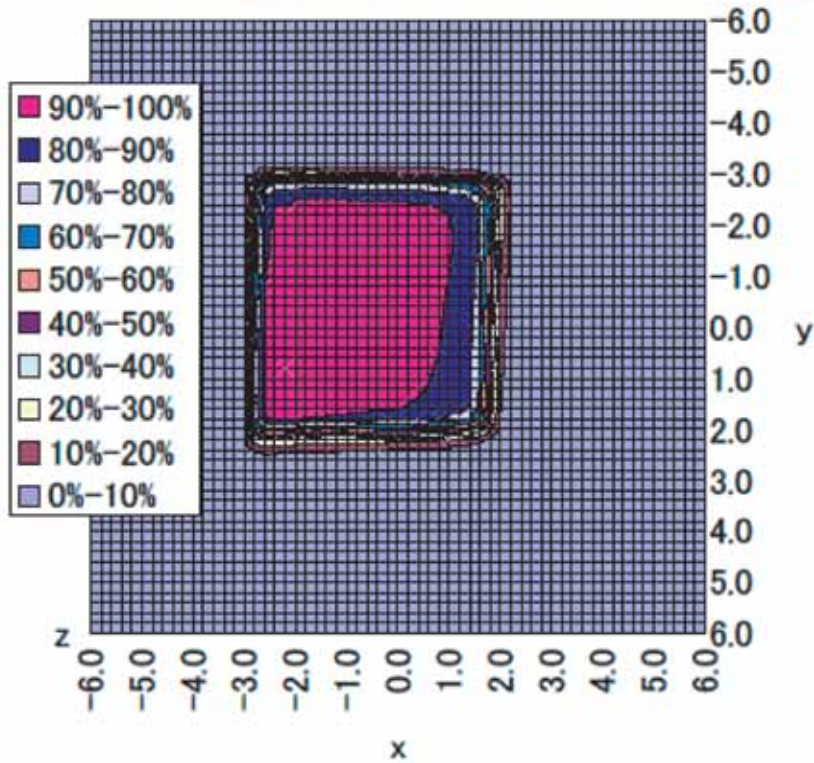


図5: チップ A、ch29(中央付近)の出力(クロストークを示す)

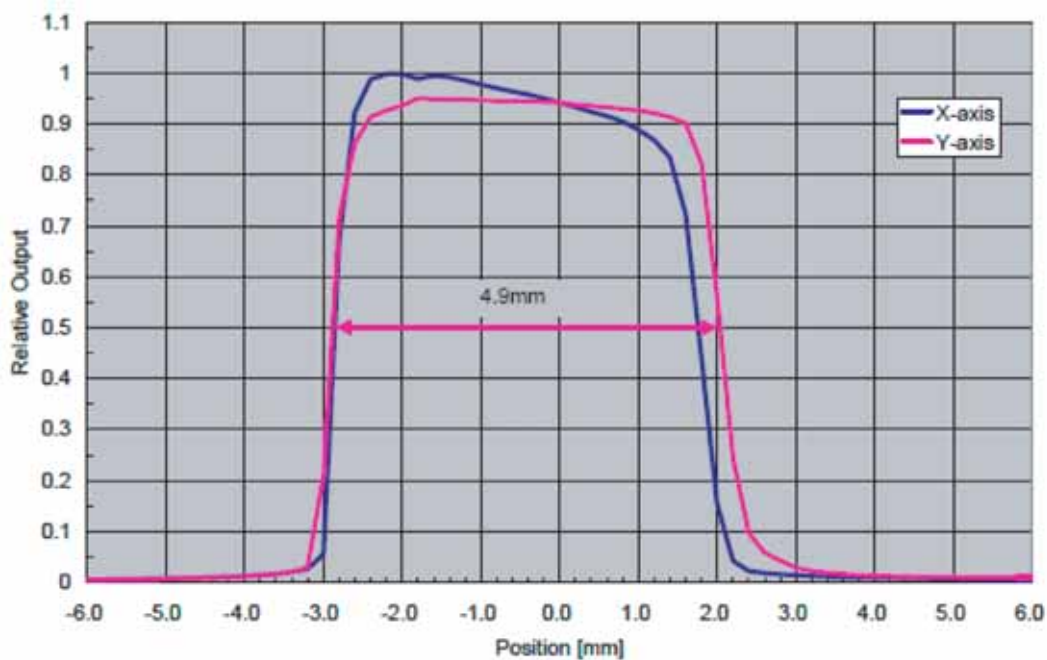


図6: チップ A,ch1の中心を通るx、y軸方向の出力

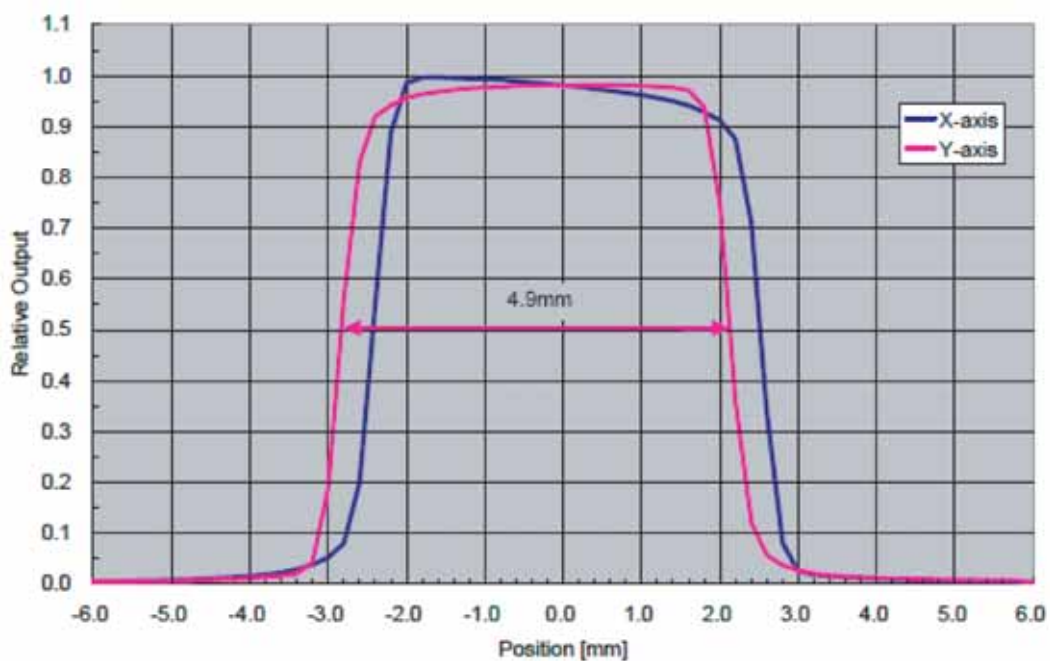
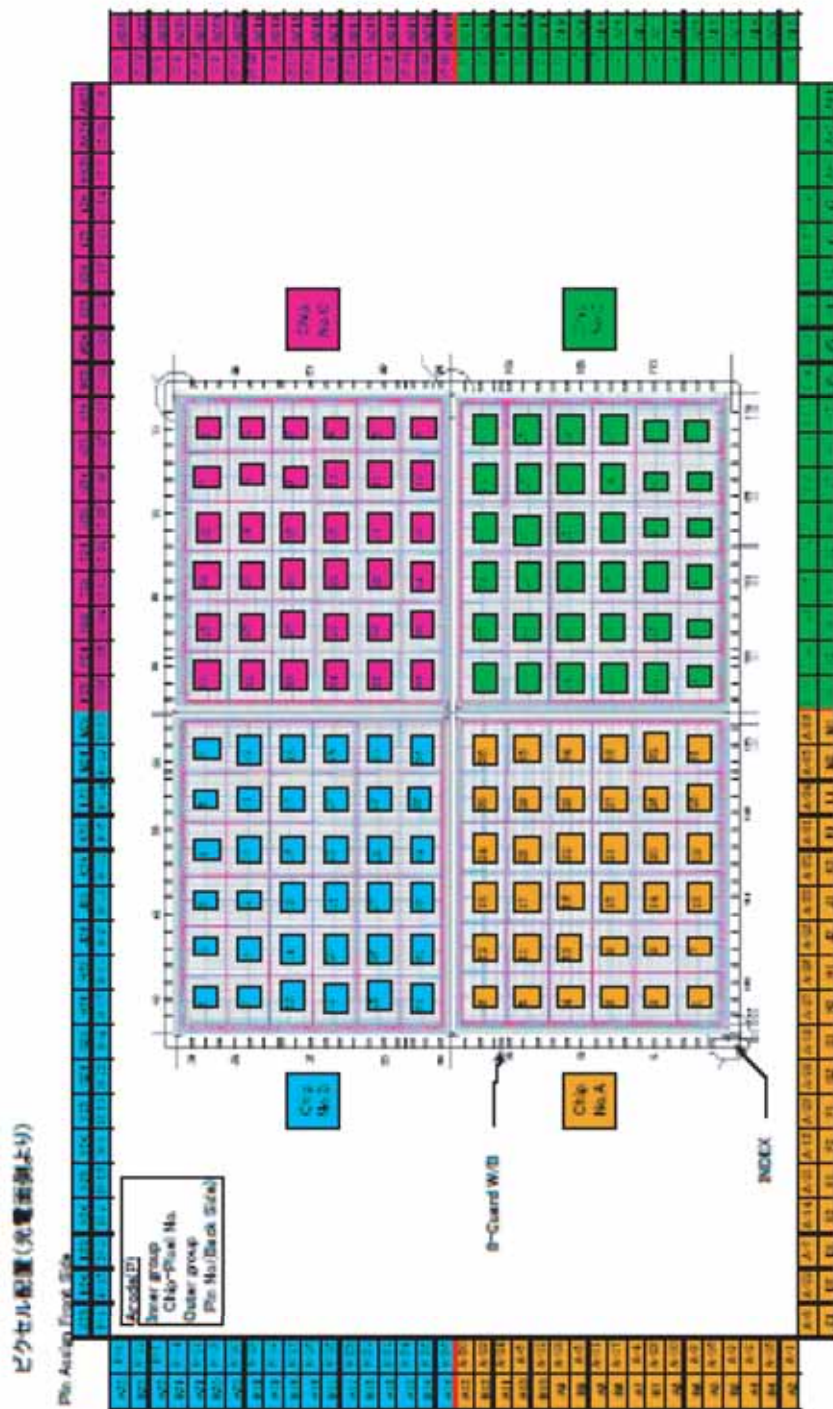


図7: チップ A,ch29の中心を通るx、y軸方向の出力



144 channels HAPD ピクセル配置

謝辞

本研究にあたり多くの方のご協力、ご指導を承りました。この場をお借りし、感謝の念を捧げます。

私の担当教官であり、修士課程2年間最後までご指導して頂き、また Belle 実験に参加する機会を与えてくださりました東京都立大学の住吉孝行教授に深く感謝致しております。高エネルギー加速器研究機構の池田博一助教授には実験のご指導を頂き感謝しております。

また、Belle 実験グループの共同研究者である高エネルギー加速器研究機構の足立一郎助教授、西田昌平助手、名古屋大学の飯島徹助教授、東京都立大学学振研究員の松本崇博氏、同大学の関貴之氏、千葉大学の海野裕士氏、総研大学の齋藤真一氏、内田裕美氏には高エネルギー実験における研究を指導して頂いたこと真に感謝致します。

同実験グループに所属し、共に実験に参加した名古屋大学の小酒井良延氏、中野裕章氏、千葉大学の小西正信氏、福嶋知一氏、東邦大学の太田晋造氏、東京都立大学の中川尊氏にも感謝致します。

研究生生活を送る上で支えてくださった東京都立大学高エネルギー実験研究室の浜津良輔助教授、千葉雅美助手、汲田哲郎助手に感謝いたします。同研究室に所属する神谷好郎氏、李栄篤氏、石水昭夫氏、太田理氏、藤本紀行氏、ほかの学生方にも感謝の念を忘れません。私に高エネルギー実験の楽しさを教えて頂いた皆様との出会いに感謝致しております。

最後に私を修士課程に進学させて下さり、生活を支えて下さった私の家族と友人達に心から感謝致します。

参考文献

- [1] 小林 誠, 消えた反物質, 講談社
- [2] 南部陽一郎, クォーク, 講談社
- [3] 福井 崇時, 粒子線物理計測学入門, 共立出版
- [4] 石黒浩三, 光学, 裳華房
- [5] T. Matsumoto et al., Studies of promixity focusing RICH with an aerogel radiator using flat-panel multi-anode PMTs(Hamamatsu H8500), Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2004
- [6] Motohiro Suyama, The Graduate University for Advanced Studies, Doctor thesis, 2002
- [7] 関 貴之, 東京都立大学, 修士論文,2003
- [8] 田端 岳彦, 千葉大学, 修士論文,2002