

新型高性能光検出器（HAPD）読み出し
のためのASICの開発

東京都立大学 大学院 理学研究科
高エネルギー実験研究室
履修番号 s0483384 中川 尊

概要

B中間子を用いCP非保存現象を研究する Belle 実験では、B中間子崩壊から生ずる K 中間子と π 中間子の識別が必要不可欠である。現在私が属する Belle 実験サブグループである ACC (Aerogel Chrenkov Counter) グループでは、エアロジェルを用いた閾値型の光検出器を用いて高運動量領域での K 中間子と π 中間子の識別を担当している。現在の Belle 測定器における K/π 識別は他の測定器と情報を併せ、全事象を 90%以上の確率で π 中間子と K 中間子の分離が達成されている。しかし超対称性粒子の様常等の新事象の検出には希崩壊現象の検出が不可欠であり、より高い粒子識別能力が求められる。そこで、更なる粒子識別能力向上を目標に ACC グループでは検出器のアップグレードとして A-RICH (Aerogel Ring Image Chrenkov Counter) 検出器を採用することを計画している。

A-RICH 検出器は荷電粒子が輻射体であるエアロゲルを通過する際に円錐状に放射される Chrenkov 光を位置分解能を持つ光検出器によって捉え、検出器上の位置情報から Chrenkov 光の放出角を再構成することで、粒子識別を行うものである。A-RICH に使用される光検出器として「十分な有効面積」「高い検出効率」「位置分解能」そして Belle 検出器内に設置するため「1.5 T の磁場中で動作可能」という条件が求められる。これらを満たすものは現在市販されているの光検出器では難しい。そこで我々は高い透過率を有するエアロゲルの開発と平行し、新型光検出器の研究開発を行っている。

我々は要求を満たす光検出器として、(株)浜松ホトニクスと共同で、HAPD (Hybrid Avalanche Photo Detector) と呼ばれる新形マルチアノード光検出器を共同開発している。現在試作されている HAPD は $72 \times 72 \text{mm}^2$ (有効エリア $59 \times 59 \text{mm}^2$) の大きさを持ち 12×12 の array に分離されている。そして 1 台につき 144 channels の出力を持ち、1 つの出力あたり約 80pF の検出器容量を持っている。

また Belle 検出器に設置される予定の A-RICH 全体では HAPD (144ch/HAPD) を 700 台用いる。このとき信号読み出しは約 10 万 Channel となる。そこでこれらの膨大な信号を処理するシステムが必要となってくる。このため我々は HAPD 処理用の集積回路を開発した。

本論文では試作された HAPD の評価及び、HAPD からの信号処理用集積回路 (ASIC:S03) の試作経緯と性能評価に関して報告する。

目次

第1章 Belle 実験	7
1.1 Belle 実験と CKM 行列	7
1.2 KEKB 加速器	9
1.3 Belle 検出器と粒子識別	11
1.4 K/π 識別を担う ACC	13
第2章 A-RICH	16
2.1 EndcapACC の改善点	16
2.2 A-RICH 検出器	17
2.3 A-RICH 検出器へ要請される物	19
2.3.1 光検出器と読み出しシステム	22
第3章 HAPD(Hybrid Avalanche Photo Diode) 読み出しの評価	25
3.1 HAPD 試作概念	25
3.1.1 APD(Avalanche Photo Diode)	26
3.2 HAPD 検出器構造 ~ 従来の PMT との比較	29
3.3 試作された HAPD	30
3.4 測定	31
3.4.1 結果	35
3.5 まだ行われていない評価	36
第4章 HAPD 信号処理用回路の開発と評価	39
4.1 ASIC 構成概念と試作	39
4.1.1 構成概念	39
4.1.2 アナログパート	40
4.1.3 デジタルパート	42
4.2 ASIC 開発の経緯	42
4.2.1 S01 での問題点	42

4.2.2	S02 での問題点と改良	43
4.3	IC 製造プロセス	46
4.3.1	作成された IC と要求仕様	47
4.4	測定	47
4.5	S03 における問題点	63
4.6	HAPD との接続	64
4.6.1	測定目的	64
4.6.2	結果	66
第 5 章	結論と今後	72
5.1	HAPD	72
5.2	ASIC	72
謝辞		73

目次

1.1	Unitarity triangle	9
1.2	電子・陽電子非対称エネルギー衝突型円形加速器：KEKB	10
1.3	Belle 検出器の断面図	13
1.4	Belle K/π 識別能力	14
1.5	ACC における K/π 中間子運動量識別範囲	15
2.1	荷電粒子速度 β と Cherenkov 角 θ の関係	18
2.2	RICH 検出器の種類	20
2.3	シリカエアロゲル：写真とゲル構造	22
2.4	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	23
3.1	半導体のバンド図	27
3.2	PN 接合と電圧	29
3.3	一般的な PMT の構造	30
3.4	HAPD の構造	31
3.5	144 channel HAPD の外観及び寸法	32
3.6	正逆 BIAS での読みだしにおける配線図	34
3.7	実験セットアップ	34
3.8	負逆 BIAS におけるシングルフォトンの観測	36
3.9	正逆 BIAS におけるシングルフォトンの観測	37
3.10	HAPD の Uniformity 観測	38
4.1	Signal 処理の流れ	40
4.2	Analog 回路ブロック	41
4.3	S01-OFFSET	43
4.4	S02、S03 における BIAS 回路	44
4.5	S02、S03 における前置増幅器回路	45
4.6	S02、S03 におけるオフセット ADJ 生成用負荷抵抗	46

4.7	S02 における NOISE のシュミレーション値	47
4.8	S02 における NOISE; 計測値	48
4.9	S02 電源系統の検出器容量依存性; VDD	49
4.10	S02 電源系統の検出器容量依存性; VSS	49
4.11	S02 出力波高の検出器容量依存	50
4.12	S03 における NOISE のシュミレーション値	50
4.13	S03 電源系統の検出器容量依存性; VDD	51
4.14	S03 電源系統の検出器容量依存性; VSS	51
4.15	S03 出力波高の検出器容量依存	52
4.16	S03 のレイアウト	52
4.17	IC の要求仕様と写真	53
4.18	概念図	54
4.19	アナログボード写真	54
4.20	デジタルボード写真	55
4.21	S03:前置増幅器測定	56
4.22	S03:前置増幅器シュミレーション	56
4.23	S03:整形増幅器測定	57
4.24	S03:整形増幅器シュミレーション	57
4.25	S03:最終利得増幅器測定	58
4.26	S03:最終利得増幅器シュミレーション	58
4.27	S03-VETO 信号	59
4.28	S03 デジタル出力	60
4.29	閾値電圧とトリガー信号の出力割合	61
4.30	線形性	62
4.31	ピーク波高の検出器容量依存性: S02 vs S03	63
4.32	雑音レベル: S02 vs S03	64
4.33	OFFSET 調整用 DAC の線形性	65
4.34	OFFSET 調整による値の調整	66
4.35	S03 における前置増幅器回路図 2	67
4.36	S03 における充電時間	68
4.37	HAPD+ADIC の SetUp	68
4.38	オシロスコープによる写真	69
4.39	ADC 分布: Pedstal により規格化	69
4.40	HAPD+ASIC で得られた HAPD の Hit 情報	70
4.41	HAPD にビームを当てた場合とペDESTAL	71

表 目 次

1.1	Unitarity Triangle のパラメータ	9
1.2	Belle 検出器において観測対象となる粒子	11
2.1	輻射体の種類とそれぞれの屈折率	21
2.2	Super-KEKB に向けた RICH 検出器への要請	24
3.1	物質の抵抗値	28
3.2	144 channels HAPD の規格	33
3.3	144 channels HAPD の特性	33
4.1	ASIC への要求仕様	53
4.2	各増幅段における波高値	53

第1章 Belle実験

1973年に小林・益川によって中性 K 中間子の CP 対称性の破れに関して理論的な説明が与えられた。(参考文献 [1] 参照)

そこで、1980年に三田たちによって小林・益川モデルが正しいとすると B 中間子の崩壊でより大きな CP 非対称を観測できる可能性が提案された。

ここで Belle 実験は CP 対称性の破れを検証することを目的に 1999 年から始まった実験である。(参考文献 [2] 参照) Belle 実験では非対称エネルギー衝突型円形加速器 KEKB を用い大量の B 中間子対を生成し、その崩壊過程を詳細に観測することにより CP 非保存の研究を行っている。

第1節では小林・益川モデルが提唱する CKM 行列を第2節では Belle 実験で用いる KEKB 加速器に関して、第3節では Belle 検出器群に関して説明する。

1.1 Belle 実験と CKM 行列

CP 対称性の破れは 1964 年クローニン、フィッチによる中性 K 中間子の崩壊により観測された(参考文献 [1] 参照)。この破れを理論的に説明したのが小林誠と益川敏英である。小林と益川は、提唱された当時、 u, d, s の3種類のクォークしか発見されていなかった中で、CP 対称性の破れが起こるには少なくとも6種類のクォークが存在し、弱い相互作用によるクォークの世代間混合に CP 対称性を破る複素位相が残りうると説明した。その後の実験で残りの3粒子 c, t, b クォークが見つかり小林・益川モデルは標準理論の中核となっている。

弱い相互作用において世代間の混合を考えると、クォークの遷移の確率振幅は 3×3 の行列で

$$\begin{bmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ s \\ b \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

式 1.1 と表現され、これを CKM 行列と呼ぶ。小林・益川は、CP の破れはこの行列に含まれる複素位相で説明できるとしたのである。

複素位相を考えると式 1.1 は 18 個の自由度を持つが、バリオン数保存のために Unitary 行列でなくてはならない、また 6 個のクォーク場の位相を自由に変えてもあらゆる測定可能な物理量に影響はないので結果として 4 個の自由度を持つことになる。

式 1.1 を (A, λ, ρ, η) の 4 つのパラメータで表現する。Wolfenstein の式で表すと、

$$\begin{bmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{\lambda^2}{2} & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \frac{\lambda^2}{2} & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ s \\ b \end{bmatrix} + \mathcal{O}(\lambda^4) \quad (1.2)$$

となる。

CKM 行列の各要素は、ある世代から他の世代への遷移確率を表している。式 1.1 と式 1.2 から第 3 世代から第 1 世代への遷移を表す V_{td} と V_{ub} には複素位相の成分があり、これが CP の破れを説明しているのである。つまり CP 非保存現象の観測には $t \rightarrow d$ あるいは $b \rightarrow u$ を含んだ反応に着目すればよいことがわかる。

観測に当たり、CKM 行列の Unitary 性から、各要素には次式のような関係がある。

$$(V_{CKM}^\dagger V_{CKM})_{13} = V_{ub}^* V_{ud} + V_{cb}^* V_{cd} + V_{tb}^* V_{td} = 0 \quad (1.3)$$

この式 1.3 は複素数平面上に幾何学的に表記することができ、*Unitarity triangle* と呼ばれている。

$$\phi_1 = \arg\left(\frac{V_{cd}V_{cb}^*}{V_{td}V_{tb}^*}\right) \quad \phi_2 = \arg\left(\frac{V_{ud}V_{ub}^*}{V_{td}V_{tb}^*}\right) \quad \phi_3 = \arg\left(\frac{V_{cd}V_{cb}^*}{V_{ud}V_{ub}^*}\right) \quad (1.4)$$

この 3 角形がつぶれてなく、閉じていれば理論が正しい事を証明でき、Belle 実験ではこの Triangle の 3 辺及び 3 つの内角を決定することで CKM

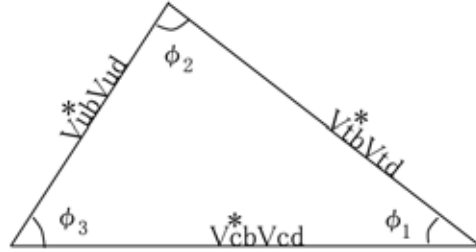


図 1.1: Unitarity triangle

モデルの検証を行っている。

これらのパラメータは B 中間子の崩壊事象を精密に測定する事から決定される。表 1.1 それぞれのパラメータ決定のために必要な観測事象をまとめる。

パラメータ	観測事象
$V_{ub}^*V_{ud}$	$ V_{ud} $ — known, $ V_{ub} $ — decay mode: $b \rightarrow u\ell\nu_\ell$
$V_{cb}^*V_{cd}$	$ V_{cd} $ — known, $ V_{cb} $ — decay mode: $b \rightarrow c\ell\nu_\ell$
$V_{tb}^*V_{td}$	$B^0\bar{B}^0$ 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 1.1: Unitarity Triangle のパラメータ

1.2 KEKB 加速器

上記の崩壊モードの中で注目されているのは $B^0, \bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_S$ のモードである。しかし、B 中間子の質量は $5.28\text{GeV}/c$ と重いため、様々な崩壊モードを起こす。 $J/\psi K_S$ に崩壊する確率は $10^{-4} \sim 10^{-5}$ と非常に低い。このため CP 対称性の破れを観測するには大量の B 中間子を作り出す必要がある。これに対応するため年間 10^8 の B 中間子対を生成出来る様に

設計されたのが、KEKB-factory である。B-factory では電子 $e^- (8\text{GeV}/c)$ ・陽電子 $e^+ (3.5\text{GeV}/c)$ の衝突により b クォークと \bar{b} クォークの共鳴結合粒子である $\Upsilon(4s)$ を作る。 $\Upsilon(4s)$ の質量は $10.58\text{GeV}/c^2$ で、これは $B\bar{B}^0$ を作り出すぎりぎりのエネルギーであり B 中間子のほかには何も余計な粒子を含まない、非常にクリーンな B 中間子対を生み出すことができる。しかし、B 中間子が静止していると ψK_S に崩壊するための時間は約 1 ps で、このままでは B 中間子と \bar{B}^0 の崩壊時間差の測定は技術的に困難である。そこで、電子・陽電子のエネルギーをそれぞれ電子 $e^- (8\text{GeV}/c)$ ・陽電子 $e^+ (3.5\text{GeV}/c)$ と非対称にすることによって生成される B 中間子対に運動量を持たせるようにしている。こうすることで相対論的效果によって 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としている。このように B ファクトリーは非対称エネルギー型の加速器であり、電子・陽電子は別々のリングで蓄積されている。KEKB の構成を図 1.2 に示す。周長 3km の 2 つのリングは、TSUKUBA

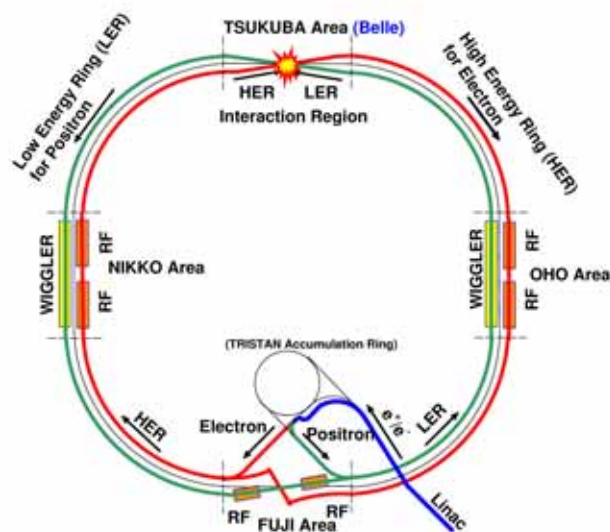


図 1.2: 電子・陽電子非対称エネルギー衝突型円形加速器：KEKB

エリアで交差しており、電子・陽電子はこの点で 11mrad の角度を持って衝突する。

2004年1月から KEKB は Continuous Injection モードで運用されている。これはデータ収集を中断させることなく線形加速器から連続的にビームを入射させるというものである。このモード下で KEKB の性能はアメリカの同様の B-factory 加速器である、PEP-II を凌駕し、世界最高の性能を出している。

1.3 Belle 検出器と粒子識別

前節でも述べたが、 $B(\bar{B})$ 中間子のある特定の崩壊過程を高精度で観測することが CP 破れの研究に不可欠である。しかし $B(\bar{B})$ 中間子は崩壊寿命が短く直接観測することは出来ない。そこで Belle 検出器では B 中間子からの崩壊によって生じる 2 次粒子を精密に観測し、親粒子である $B(\bar{B})$ 中間子の同定を行っている。(これをフレーバー・タギングと呼ぶ。) 図 1.2 に測定対象となる粒子をあげる。

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

表 1.2: Belle 検出器において観測対象となる粒子

これらの粒子を精度よく測定するために、Belle 検出器は役割によって 6 種類の副検出器群からビーム衝突点を囲むように構成され、衝突点から近い順で SVD、CDC、ACC、TOF、ECL、KLM の順で配置されている。図 1.4 に Belle 検出器の断面図を示す。これに加え TRG (トリガーシステム)、DAQ (データ収集システム) がある。

下記に副検出器群について簡単にまとめる。

- SVD シリコン・バーテックス検出器
SVD は半導体検出器を複数層にわたって円筒状に構成したもので、検出器の中で最もビーム衝突点に近い位置に配置されている。
B 中間子の崩壊点を高精度で測定することを担当している。

$$\text{位置分解能 } \Delta\sigma_z = 80 [\mu\text{m}]$$

- CDC 中央飛跡検出器

CDCはSVDの外側に配置され、荷電粒子の磁場中での飛跡検出による運動量測定と、低エネルギー領域における K/π の識別を担当している。

$$\text{飛跡分解能} : \sigma_p = 0.3\% \sqrt{1 + p^2} \text{ [GeV/c]}$$

$$\text{エネルギー損失分解能} : \sigma_{dE/dx} = 6\% E \text{ [GeV/c]}$$

- ACC エアロジェル・チェレンコフカウンター

ACCはエアロジェルと呼ばれる物質をチェレンコフ光の発光体にした、閾値型の検出器である。主に高い運動量領域における K 中間子、 π 中間子の識別を担当している。

$$\text{識別可能範囲} : 1.2 < p < 3.5 \text{ [GeV/c]}$$

- TOF 飛行時間測定器

TOFは 1.2 [GeV/c] 以下の低い運動量領域における K 中間子、 π 中間子の識別を担当している。またBelle検出器全体の読み出しのためのトリガー信号も提供している。

$$\text{時間分解能} : 100 \text{ [ps]}$$

$$\text{識別可能範囲} : p < 1.2 \text{ [GeV/c]}$$

- ECL 電磁カロリメーター

ECLは電磁シャワーを利用して光子と電子の全エネルギーを検出する。

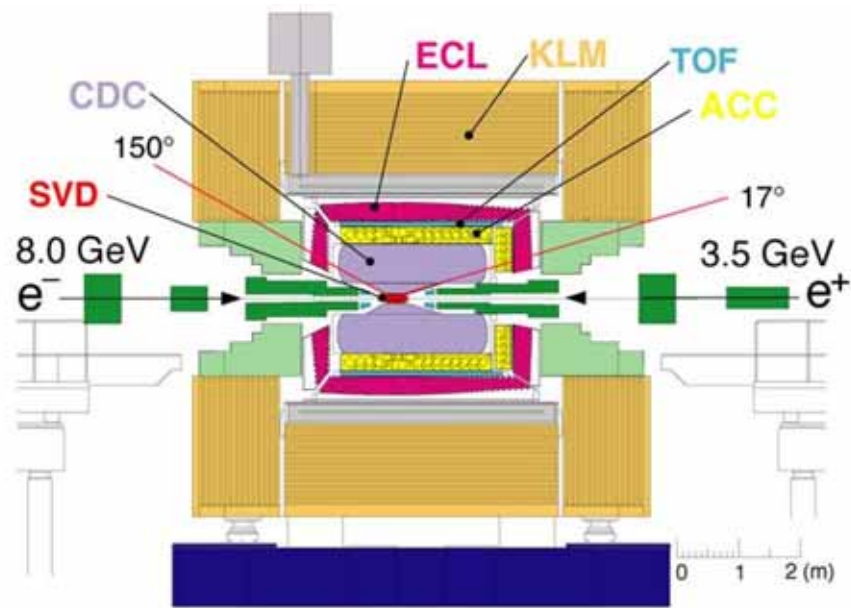
$$\text{エネルギー分解能} : \sigma_E = 1.3\% \sqrt{E} \text{ [GeV]}$$

- KLM K_L/μ 識別検出器

KLMはBelle検出器の中でビーム衝突点から最外部に位置する測定器で、 K_L 粒子と μ 粒子の検出を担当している。

$$\text{角度分解能} : 30 \text{ [mrad]}$$

$$\text{時間分解能} : 1 \text{ [ns]}$$



Belle検出器の側面図。

図 1.3: Belle 検出器の断面図

1.4 K/π 識別を担う ACC

表 1.1 に見られるように B 中間子は様々な崩壊をし、崩壊過程の理解には、様々な 2 次粒子を識別する必要がある。中でも K/π 識別はフレーバー・タギング(親である B 中間子の特定)のみならず、Unitarity Triangle の内角 ϕ_2, ϕ_3 の測定に際しても重要になってくる。

Belle 検出器内において K/π 識別を担っているのは、CDC、ACC、TOF の 3 グループである。この 3 つの検出器はそれぞれ識別能力が低い運動量領域を互いに補い、Belle 全体として 3.0σ 以上の識別能力を達成している。図 1.4 にそれぞれの識別能力を示す。

私が属する ACC(Aerogel Chrenkov Counter) では図からもわかるとおり、特に高い運動量領域 ($1.1 \text{ GeV}/c \sim 3.5 \text{ GeV}/c$) において主体的に K/π 識別を担っている。

ACC は荷電粒子が輻射体を通過する際に放射するチェレンコフ光を利用した検出器である。チェレンコフ光の発生条件は

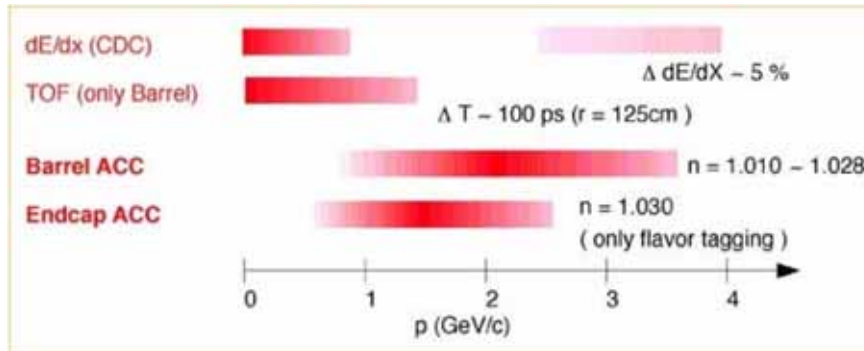


図 1.4: Belle K/π 識別能力

$$\beta > \frac{1}{n} \quad (1.5)$$

であり、輻射体の屈折率によって荷電粒子は Chrenkov 光を発生させる
 閾値運動量 $p_{threshold}$

$$p_{threshold} = \frac{m\beta}{\sqrt{1 - \left(\frac{1}{n}\right)^2}} = \frac{mc}{\sqrt{n^2 - 1}} \quad (1.6)$$

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。すなわち輻射体に対して、屈折率を適切に選べば、 π のみ光を出すということが可能であり、それによって粒子識別を行うことが出来る。現在の ACC ではシリカエアロゲルと呼ばれる物質を輻射体として採用している。これは屈折率 $n = 1.01 \sim 1.03$ を持つ。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 1.5 にシリカエアロゲルの屈折率に対する K 及び π の閾値運動量を示す。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 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 1.4 に見られるように、ACC は Belle 検出器内で 2 つの領域がある。ビームラインに沿って Belle 検出器を包む円筒である Barrel 部と円筒の蓋である EndCap 部である。両方で決定的に違うことは Endcap 領域では空間的制約のため低運動量領域を担当する TOF が配置されていないことである。そのため EndCap 部ではフレーバー・タギングのみを観点におき、屈折率 $n = 1.03$ のエアロジェルのみを用いた ACC が採用されてい

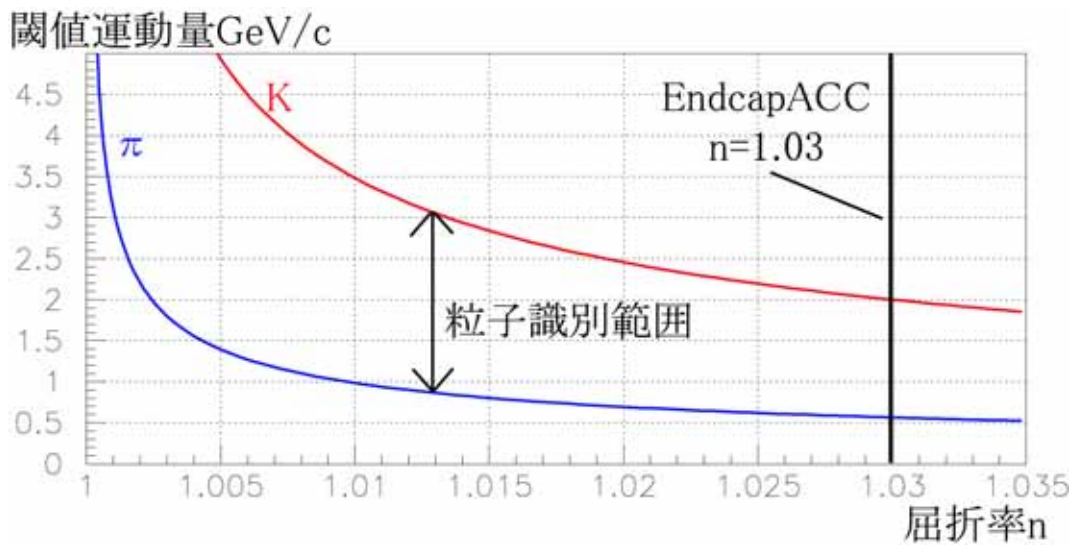


図 1.5: ACC における K/π 中間子運動量識別範囲

る。そのため Endcap 部では $3.5 \text{ GeV}/c$ を上回る高い運動量領域において対応できていない。

CP 非保存の研究にみならず、希崩壊現象の研究に対しても、 K/π 識別は極めて重要で Endcap 領域における K/π 識別能力の向上が重要課題となってくる。そこで ACC グループでは Endcap 領域において、検出器のアップグレードを行い、より広範囲な運動量領域に対応する検出器を開発研究している。

第2章 A-RICH

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。

より稀な確率の事象を捉えるためには現在の Belle 検出器の K/π 中間子識別能力の向上が必要不可欠である。

そのため全データ量に対して 95% の識別能力を有するような検出器の Upgrade が計画されている。

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) 検出器の開発研究を行っている。

第1節では現在の ACC の問題点を、第2節ではその対策である A-RICH 検出器に関して、第3節では A-RICH 検出器における要請に関して述べる。

2.1 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、 $n > 1$ の条件のときに放射されるチェレンコフ光の有無を利用し K/π 識別を行っている。

現在の ACC での問題点は主に 2 つあげられ

- EndcapACC での運動量領域の拡大
- knock-on 電子による Cherenkov 光の影響の除去

という点である。

第一の問題点は Belle 検出器の Endcap に設置されているシリカエアロゲルはフレーバー・タギングのみを目的に屈折率 $n=1.03$ のみを使用し運動量 $0.5 < p < 2.0 \text{ GeV}/c$ の領域しか対応できていない。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出来ないということである。

また、2 つ目の問題点として knock-on 電子によるチェレンコフ光の影響がある。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 に対してチェレンコフ光を発生させ、 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。

ACC において K/π 識別能力の向上にはこれらの問題点を解決することが不可欠である。そのために ACC では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。

2.2 A-RICH 検出器

A-RICH 検出器における基本構成は現在の ACC と同じで輻射体とチェレンコフ光を検出する光検出器から成る。しかし ACC がチェレンコフ光の有無を利用していたことに対し A-RICH では荷電粒子が輻射体を通過する際に放射されるチェレンコフ光から通過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を行うものである (式 1.6 参照)。

荷電粒子の運動量 p は Belle 検出器全体にかけられた磁場 $B = 1.5[T]$ によって曲げられた荷電粒子の飛跡の曲率から $\rho \text{ [m]}$ から $p[\text{GeV}/c] = 0.3\rho B$ で求められる。ゆえに式??から既知の p と求められた v から質量 m 、即ち粒子を識別できる。

チェレンコフ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。輻射体中をチェレンコフ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ホイヘンスの原

理から直線状に並ぶ。(図 2.1 参照)

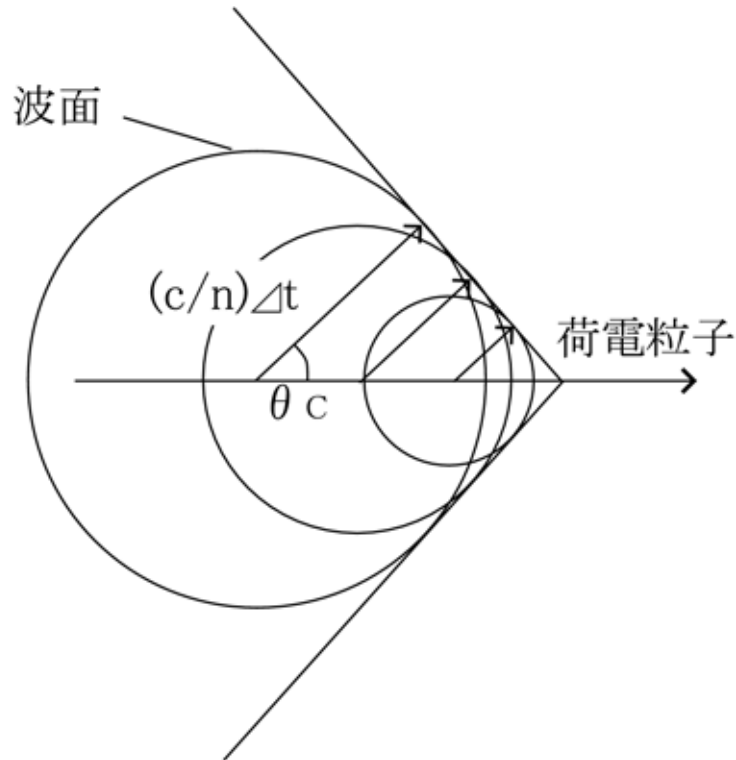


図 2.1: 荷電粒子速度 β と Cherenkov 角 θ の関係

このため、荷電粒子の速さ β とチェレンコフ光の放射角度 θ_C との関係が

$$\cos \theta_C = \frac{c \Delta t}{n v \Delta t} = \frac{1}{n \beta} \quad (2.1)$$

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チェレンコフ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チェレンコフ光を測定し、

検出器から得られるチェレンコフ光の位置情報からチェレンコフ角 θ_C を幾何学的に導出することができる。

このような識別法は θ_C をチェレンコフ光 1 つ 1 つから求めるため、knock-on 電子に左右されにくい。さらに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ことが出来る。

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

$$\frac{dN}{d\lambda} = \frac{2\pi\alpha z^2}{\lambda^2} L \sin^2 \theta_C \quad (2.2)$$

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。またこの時の光子において短波長は 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 400 [nm] となっている。

このように A-RICH 検出器はチェレンコフ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 をチェレンコフ角の測定精度とし、

$$N_\sigma = \frac{\theta_K - \theta_\pi}{\sigma_C} \sqrt{N_{p.e.}} \quad (2.3)$$

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 検出器はこのチェレンコフ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 2.2 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。

2.3 A-RICH 検出器へ要請される物

A-RICH 設置することを考えると

- 輻射体
- 光検出器
- 読み出しシステムの構築

の 3 点が問題となってくる。

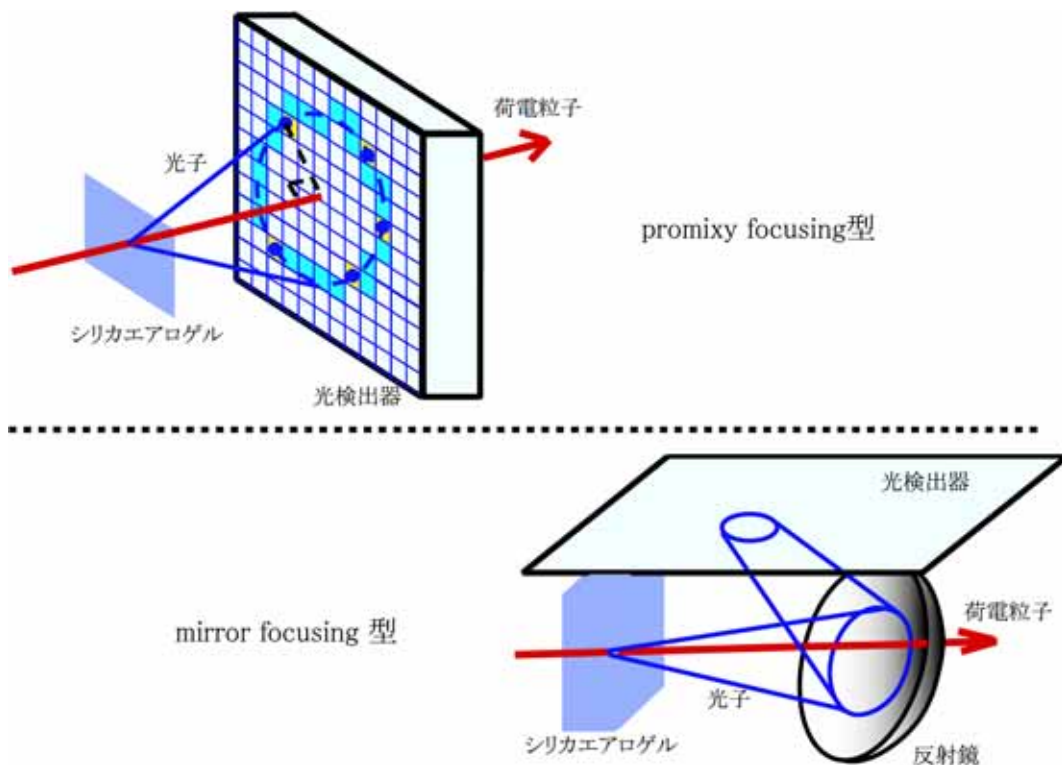


図 2.2: RICH 検出器の種類

A-RICH 用輻射体としての要請

チェレンコフ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 2.1 にまとめた。

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こととした。

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 2.3 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

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 2.1: 輻射体の種類とそれぞれの屈折率

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 2.3(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。

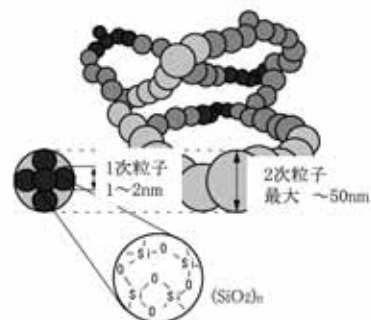
シリカエアロゲルは塩基を触媒としたゾル・ゲル法でシリカの湿潤ゲルを作り、このゲルをアルコールなどの超臨界条件の下で、徐々に溶媒を抜いて乾燥（超臨界乾燥）させる。このゾルゲル法のアルコキシドと溶媒としてのアルコールの混合比を調節することでシリカエアロゲルの密度を決定する。その結果、屈折率を 1.006 ~ 1.060 の間で制御することが可能である。また透過長は、 $(SiO_2)_n$ が構成する粒子径に依存し、これはゲル化するまでの時間に依存している。

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 2.4 は運動量 $2.0 \text{ GeV}/c$ の K/π が輻射体を通過し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上げるために必要である。

また、Cherenkov 放射角 θ_C は式 2.1 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



(a) シリカエアロゲル(写真)



(b) シリカエアロゲル構造

図 2.3: シリカエアロゲル：写真とゲル構造

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。

2.3.1 光検出器と読み出しシステム

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、十分な有効面積と高い検出効率そして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 $B [T]$ がかけられており、運動量は曲率を $\rho [m]$ としたとき

$$p[GeV/c] = 0.3\rho[m]B[T] \quad (2.4)$$

と表される。A-RICH 検出器の粒子識別は、飛跡検出器により測定された運動量 p を既知とし、とチェレンコフ光の放出角度から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。

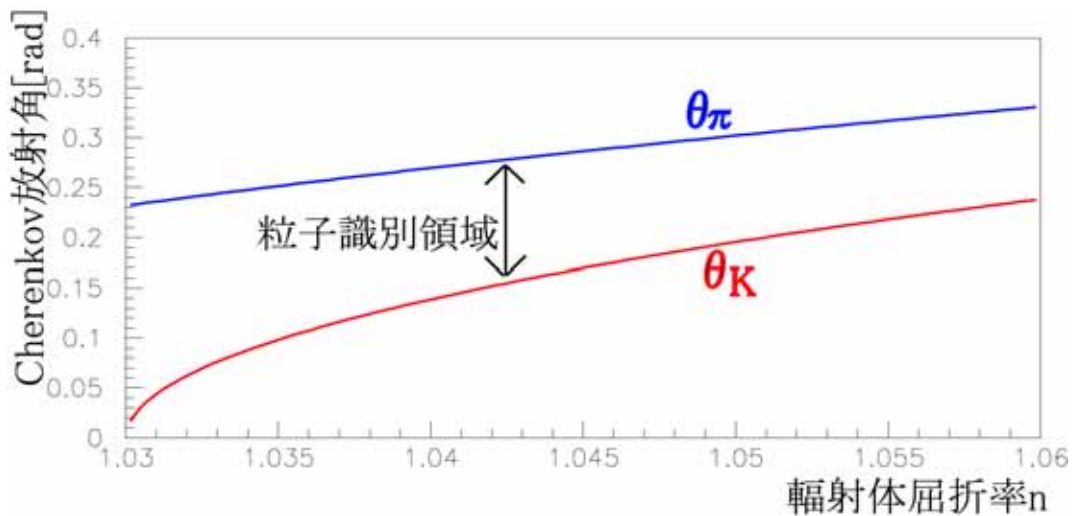


図 2.4: 荷電粒子運動量 2.0GeV のときの輻射体屈折率と Cherenkov 角の関係性

また 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 光電子の応答が得られなければならない。

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崩壊の事象を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。また位置分解能を上げるために輻射体と光検出器の間の空間を可能な限り確保したい。そのため、シグナルの読み出し回路及び光検出器のサイズにも制約が生じる。

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 2.2 にまとめた。

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新型マルチアノード光検出器 (第 3 章 HAPD 参照) の共同開発を行っている。そして新型マルチアノード光検出器用集積回路の開発を行っている。(第 5 章 ASIC 参照)

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%以上) 位置分解能 (数 mm) 高い検出効率 (90%以上) 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 2.2: Super-KEKB に向けた RICH 検出器への要請

第3章 HAPD(Hybrid Avalanche Photo Diode) 読み出しの評価

前章でも述べたが、Belle - ACCグループでは EndCap 部に A-RICH 検出器を採用することで K/ 識別能力の向上を目指している。A-RICH においてはシリカエアロゲルの性能向上と共に光検出器の選択が重要な課題となってくる。我々ACCグループでは光検出器として「HAPD」と呼ばれる新型のマルチアノード型光検出器を試作・採用しようとしている。本章では試作された HAPD に関して、概念と構造、そして性能評価に関して述べる。

3.1 HAPD 試作概念

A-RICH 検出器は Belle 検出器内に設置される。Belle 検出器内はビーム軸方向に 1.5 [T] の磁場がかかり、光検出器はこの磁場中で安定に動作することが要求される。さらに A-RICH 検出器として使用するには、チェレンコフ光つまりは 1 光電子が検出可能、位置分解能を持つ、大規模な有効面積を持つ、という 4 条件が必要となってくる。この条件を満たすものは現在市販されている光検出器では難しい。そこで我々は Hybrid Avalanche Photo Diode; HAPD を (株) 浜松ホトニクスと共同開発を行っている。HAPD は光電面からでた光電子を電場加速により Avalanche Photo Diode に打ち込み、そして APD 内での Avalanche 効果によって増幅されたキャリアーを信号として検出する。これは従来の光検出器には無い優れた性能を持つ光検出器である。

3.1.1 APD(Avalanche Photo Diode)

APD は PN 接合を利用した Si 半導体素子の一つである。

- 半導体

物質の電子の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ある。すなわち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。

許容帯は禁止帯を挟むように存在し電子のエネルギーが下位（禁止帯の下側）である価電子帯またエネルギーが上位である（禁止帯の上側）である伝導帯がある。この伝導帯における電子の有無により、物質の電気伝導性が決定され、物質は絶縁体・半導体・金属に分けることが出来る

半導体のエネルギー・ギャップ（禁止帯）は適当な大きさを持っているので、熱励起や光励起で価電子帯から伝導帯に容易に電子が励起され、電流が流れる。一方で絶縁体は禁止帯の大きさが非常に大きく、室温程度の熱励起では電子は流れない。また金属（導体）は禁止帯が無く、電子は伝導帯に最初から存在している。図 3.1 に概念図を表 3.1 に一般的な物質の抵抗値を示す。

半導体には N 型半導体（電子が過剰状態）と P 型半導体（電子が欠如した状態）がある。N 型半導体は過剰電子は価電子帯に入れる場所（軌道）がないので伝導帯に入り自由に動くことが出来る。一方 P 型半導体は電子が足りない状態であり、この空いた場所に隣の電子が容易に移動できる（当然のことながら移動した電子がいた場所は空いてしまう）。この電子の移動は正の電荷が動いているように見え、これを「正孔」と呼ぶ。

すなわち電気の担い手（キャリアー）は N 型半導体では「電子」、P 型半導体では「正孔」であり。

- PN 接合と電圧

PN 接合は P 型半導体と N 型半導体を接合したものである。これらを接合すると、接合面でフェルミ準位（物質の電子分布において、

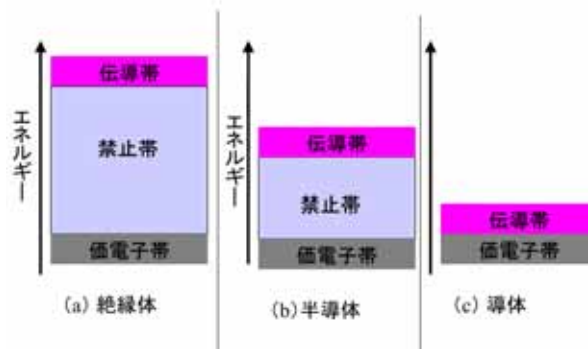


図 3.1: 半導体のバンド図

その存在確率が $1/2$ の準位のエネルギー値) が一致するように電子と正孔が移動する。しかし、接合面から離れた位置ではこの接合による電荷移動の影響は無く、本来の N 型、P 型のバンド図に変化は無い。従って接合面の近くだけバンドが曲がったエネルギー状態となる。接合の平衡状態では、各層にあった電子または正孔が流れてしまい、自由電子などが無い「空乏層」と呼ばれる層が出来る。これは N 型と P 型の導電体を挟んだようなコンデンサーを形成しているような状態である。これに順方向 (P に +、N に -) の電圧を印加すると N 側に負の電圧がかかるので、この負電位で電子の準位は上がり、N 型にいる自由電子のエネルギーレベルは P 型より大きくなり N から P に電子が移動する。同様に正孔は P から N へ移動する。

一方で逆方向 (P に -、N に +) の電圧を印加すると、P 側に負の電圧がかかる。これは N 型が印加電圧 V だけ下がる事を意味している。このとき P 型の電子レベルが N 型より大きくなるので、P 型から N 型へ電子が移動する。しかし P 型において電子は少数キャリアなので流れる電流は非常に小さい。図 3.2 に各状態の概念図を示す。

物質		抵抗率 [$\Omega \cdot cm$]
絶縁体	ポリエチレン	10^{18}
	ゴム	10^{14}
	ガラス	10^{14}
半導体	シリコン	$10^6 \sim 10^2$
	GaAs	$10^{-2} \sim 10^8$
	ゲルマニウム	$10^{-2} \sim 10^2$
導体	グラファイト	10^{-2}
	ニクロム	10^{-4}
	銅	10^{-6}

表 3.1: 物質の抵抗値

- PD(Photo Diode) と APD(Avalanche Photo Diode)

PN 接合に光が入射すると、P 領域に正孔・N 領域に電子が集まり電圧が生じる。その電圧または電流を測定し光センサとして利用することができこれをフォトダイオードと言う。フォトダイオードは光電子増倍管と比べ量子効率が高い、小型化が可能、磁界に影響されない、ダイナミックレンジが広いなどという特長がある。その一方で、ノイズが大きく、増倍率が低いため、極微弱光の検出においては光電子増倍管の方が優れている。APD はフォトダイオードに逆バイアス印加時により大きくバンドが曲がった領域を設けている。これにより P 型の少数キャリアである電子が N 型に移動するとき、バンドの曲がりが大きいため、移動するにつれて、そのエネルギーは非常に大きくなり、原子にある電子にエネルギーを与え、それが自由電子となり電流に寄与する。そしてその電子が再び他の電子を励起することを繰り返し電子は爆発的に増えていく。

3.2 HAPD 検出器構造 ~ 従来の PMT との比較

HAPD との比較のために、先に最も良く使用されている従来型の光電子増倍管を載せる。

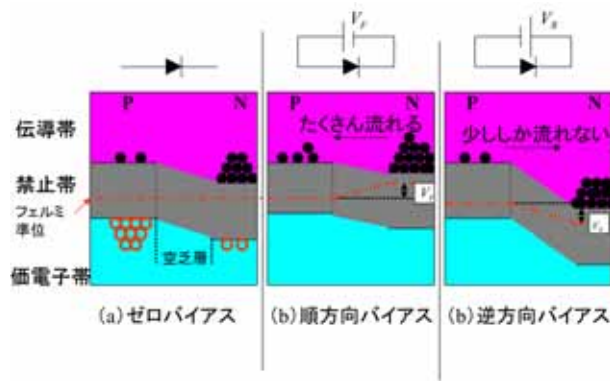


図 3.2: PN 接合と電圧

従来型の光電子増倍管では、光電子は集束（フォーカス）電極で第一ダイノード上に収束され、二次電子増倍された後、引き続き各ダイノードで二次電子放出を繰り返す。ダイノードはおおよそ 8 ~ 19 段で構成され、最終的な Gain は $10^7 \sim 10^8$ に達する。

一方、HAPD は真空管技術と半導体技術を組み合わせて作られている。

光電面から出た光電子を管に垂直に印加された約 8kV の電場で加速することにより、電子は 8 keV のエネルギーを持って真空管内に配置された APD (Avalanche Photo Diode) へ打ち込まれる。APD は Si で構成され、APD 内では 3.64 [eV] のエネルギーにつき 1 対の電子・正孔ペアを生成し、打ち込みによって 10^3 のキャリアーを得ることができる。さらに APD の Avalanche 効果による内部利得によりキャリアーはさらに増幅され約 10 倍される。結果として HAPD は 10^4 程度の Gain を得る事ができる。

HAPD は一般的な PMT と違い複雑な増倍部を用いないので、信号の統計的な揺らぎが少なく、波高の揃った 1 光電子の分布が得られる。しかし、Gain が小さいことから読み出しには高利得、低雑音な増幅器を必要とする。

試作された 144ch HAPD ではマルチアノード光検出器にするため APD にピクセルを設けてある。マルチアノード用 APD は、一つの N 型ダイ

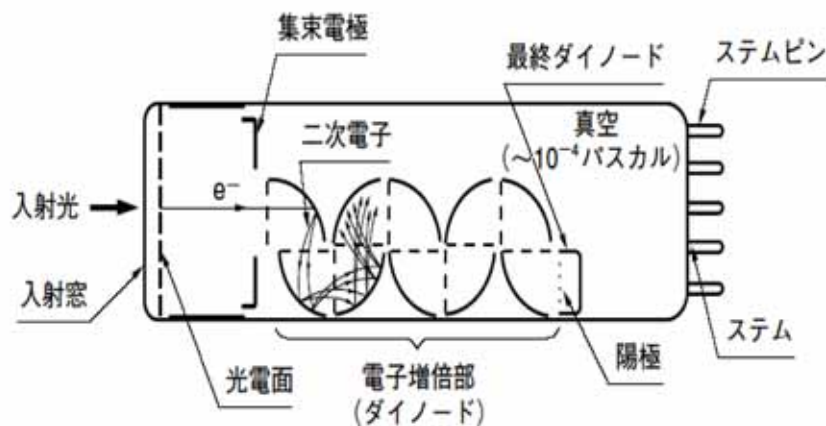


図 3.3: 一般的な PMT の構造

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。

3.3 試作された HAPD

A-RICH 用光検出器としては 144 channel/HAPD を使用することが予定されている。試作された HAPD は外形は角型で、内部に 1 チップ当たり 36 チャンネルの APD が 4 つ配置された構造になっている。これは一つには A-RICH を設置するに当たり不感領域を可能な限り取り除くためである。そしてもう一つには、HAPD 内の電場ベクトルと Belle 検出器内にかかる 1.5[T] の磁場とほぼ平行とするためである。図 3.5 に試作された HAPD の写真と特性を示す。

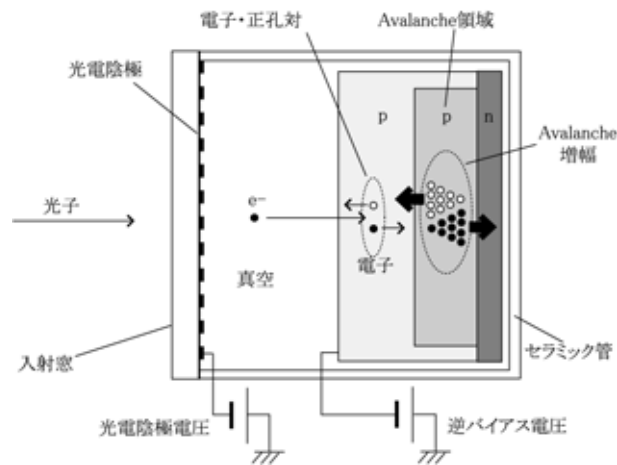


図 3.4: HAPD の構造

3.4 測定

測定に際し、測定項目の明確な目的を示す。

測定は 2005 年度に修士課程を修了された山本俊吾氏の測定項目を引き継ぐと共に次章 ASIC における測定において必要となってくる項目に関して行った。

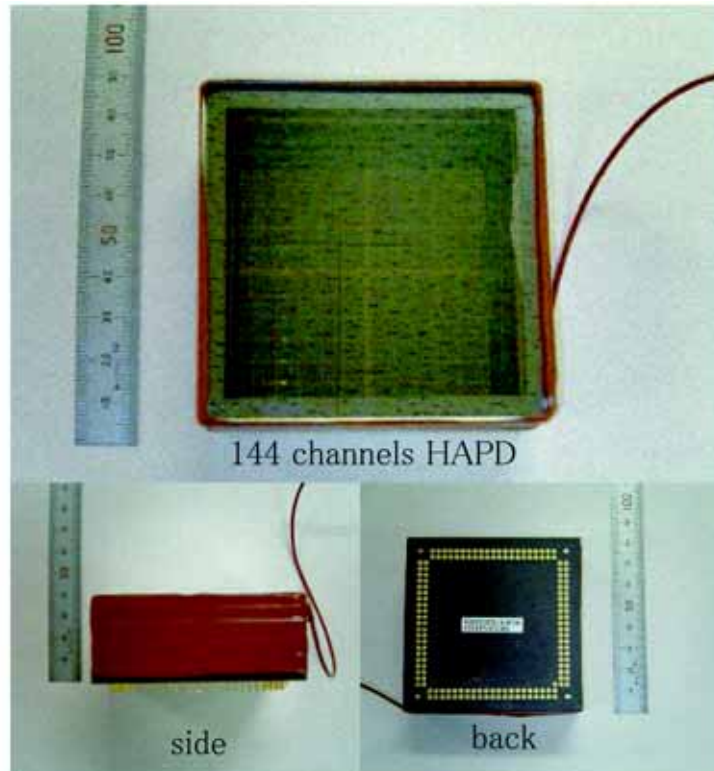
以下に測定項目を述べる。

- 正負逆 BIAS における 1 光子応答

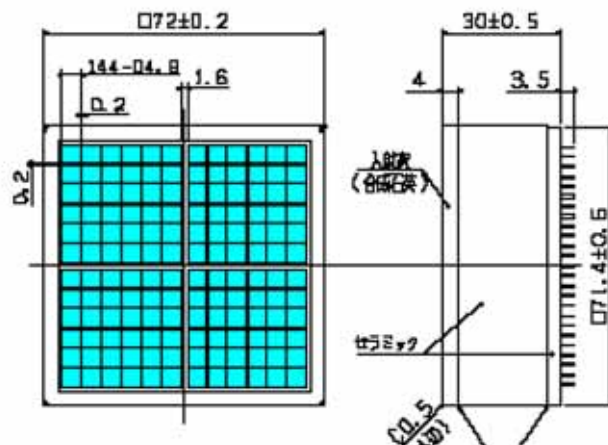
HAPD は APD に逆バイアスを印加することによって、信号を検出する。この際問題となるのは、APD にかかっている電位差に他ならず、どちらの極性を印加するかにはよらないはずである。

A-RICH 用に試作された HAPD は Cathode が全て繋がっており正極性を印加する事により 1 Chip 内の全チャンネルの APD に逆バイアスを印加することが出来るようになっており、本実験では正逆バイアスを使用する予定である。

今回は 1 チャンネルにおける負逆バイアス及び、正逆バイアスに関して 1 光子相当の光を検出できるかを調べた。



(a) 144 channels HAPD の外観



(b) 144 channels HAPD の寸法

図 3.5: 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 3.2: 144 channels HAPD の規格

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 3.3: 144 channels HAPD の特性

(-) 極性での測定と評価における詳細は昨年度、当研究科を卒業された山本俊吾の修士論文を参照されたい。

HAPD は利得が低く、読み出しには高利得で低雑音な増幅器を必要とする。これには前置増幅器 (ClearPulse 社製 580K) 及び整形増幅器 (ClearPulse 社製 4417) を、また MCA として Amptek 社製の PocketMCA を用いて測定に当たった。

測定にあたり、HAPD へ BIAS と HV を印加し、後続の増幅器へつなげる読み出し回路が必要となってくる。図 3.7 に本測定に用いた回路を図??にセットアップを示す。HAPD への印加電圧は $HV = 8kV$

, $BIAS = 300V$ を使用した。

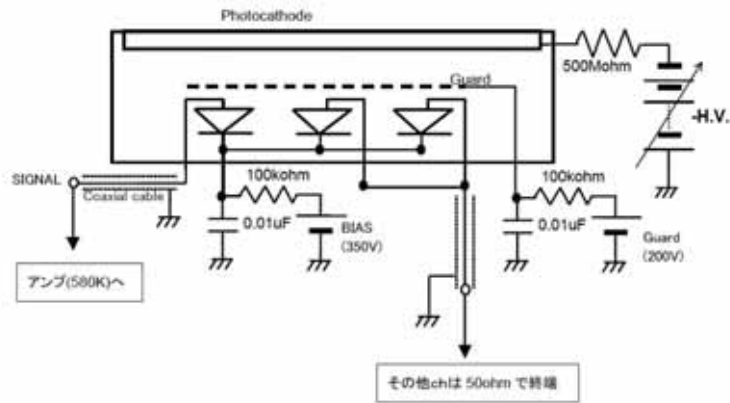


図 3.6: 正逆 BIAS での読みだしにおける配線図

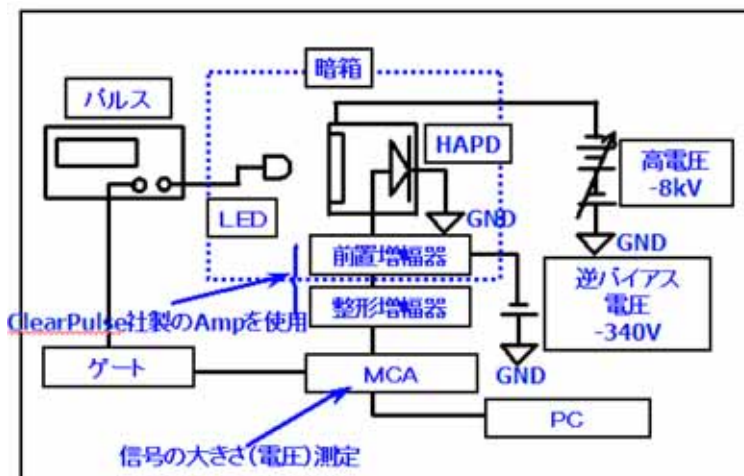


図 3.7: 実験セットアップ

- 一様性

A-RICH 検出器としては位置分解能を持つことが必須である。そこで位置による出力感度 (Uniformity) を調べる必要が出てくる。これには浜松ホトニクス社にて測定を行わせていただいた。SetUp はレンズを用い直径 $100\mu m$ まで集光させた光を HAPD に対

し X-Y 方向へ、 2mm 間隔で走査する。そのとき流れる電流量によって各 Channel における光の感度を調べた。

3.4.1 結果

- 負逆及び正逆バイアスに関して

最初に図 3.8 に負逆バイアス測定における波高分布を示す。最上段は前置増幅器の Test 入力コンデンサーを利用したテストパルスによる波形である。

ここでは HAPD の 1 光子における出力電子数を約 $8\text{kV}/3.6\text{eV} \times 10 = 20000 [e]$ として見積もった。

HAPD からの光子による出力電子数は、実際には光子を APD 内へ打ち込んだ時に発生す後方散乱、及び APD 内での Dead Layer の存在によって、幾分少なくなる。よって 1 光子相当の光を当てたときに出力はテストパルスによる出力以下になるはずである。光が 1 光子事象に近づいてくるとポアソン分布に従った、1 3 光子が光電面から放出される。中段は 1 ~ 3 光子測定の結果である。これは 1 光子事象の確証を得るために行った。下段は負逆バイアスにおける 1 光子事象である。この場合 S/N 4 程度である。

次に図 3.9 に正逆バイアスにおける結果を示す。負逆バイアスの時と同様に最上段はテストパルスによる値である。中段は正逆バイアスにおいて観測した 1 光子事象である。下段は上述した負逆バイアスにおける 1 光子事象である。

しかし波高分布からも見れるように負逆バイアスと比べるとゲインが下がっており、また S/N が大きく悪くなっている。ガウシアンによるフィッティングで負逆バイアスでは S/N 4、正逆バイアスでは S/N 1.5 となっている。これは回路系からの雑音もさることながら、HAPD からの漏れ電流が増えたためだと思われる。使用した HAPD における漏れ電流による雑音の厳密な考察はここでは行っていない。

- 光電面の一様性

図 3.10 はそのときの結果である。これを見ると菅壁周辺において著しく一様性が落ちている。これは光電面作成時における問題である。

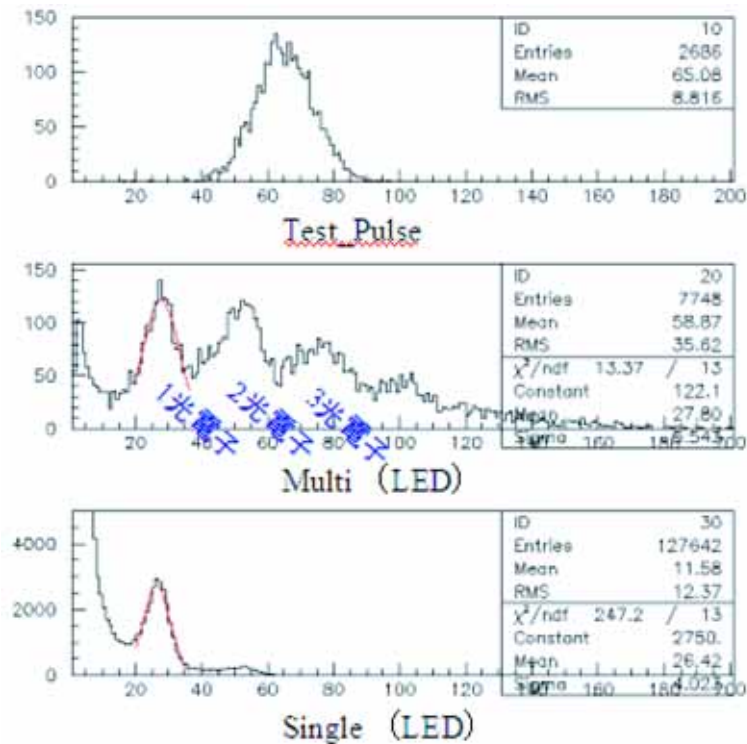


図 3.8: 負逆 BIAS におけるシングルフォトンの観測

光電面作成時にはアンチモンを蒸着するが、それが一様に蒸着されていない結果でると考えられる。

HAPD 測定においては最も感度がよいチップ中心のチャンネルを使用している。

3.5 まだ行われていない評価

これには磁場中での 1 光子事象と位置分解能の評価がある。先に述べたが HAPD においては電場によって加速された電子が APD へ入る。このとき加速された電子雲の一部は APD によって散乱される。これは無磁場では位置分解能の悪化をおこす。また HAPD の構造上、高電圧印加用の金属テープ及び、管と光電面を結び付けているインジウムが管壁周辺の電場を歪ませ、結果位置分解能を悪化させている。これは高磁場中において改善すると思われ、A-RICH の使用として大きな問題とはならな

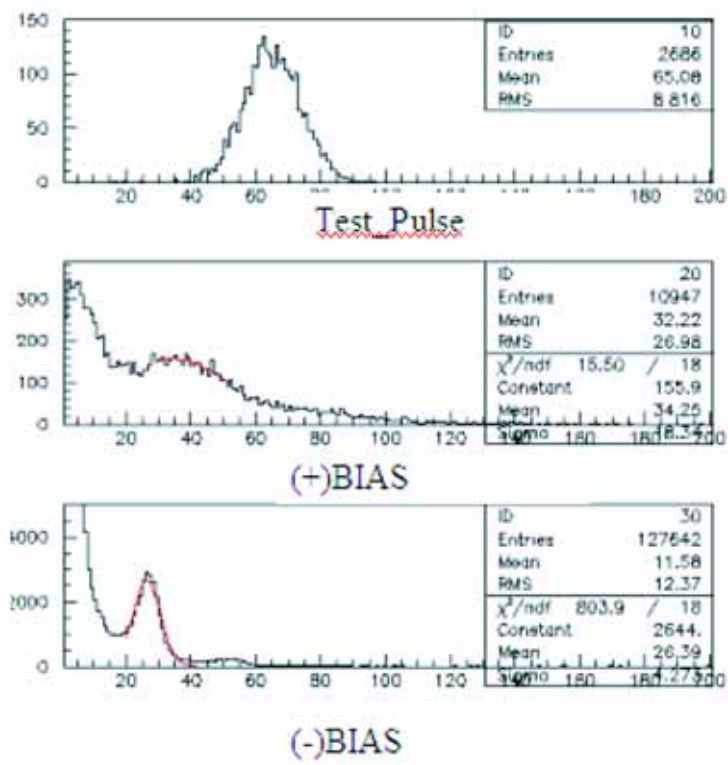


図 3.9: 正逆 BIAS におけるシングルフォトンの観測

いと考えられる。とは言え磁場中での評価はまだ行っておらず、今後の課題となる。

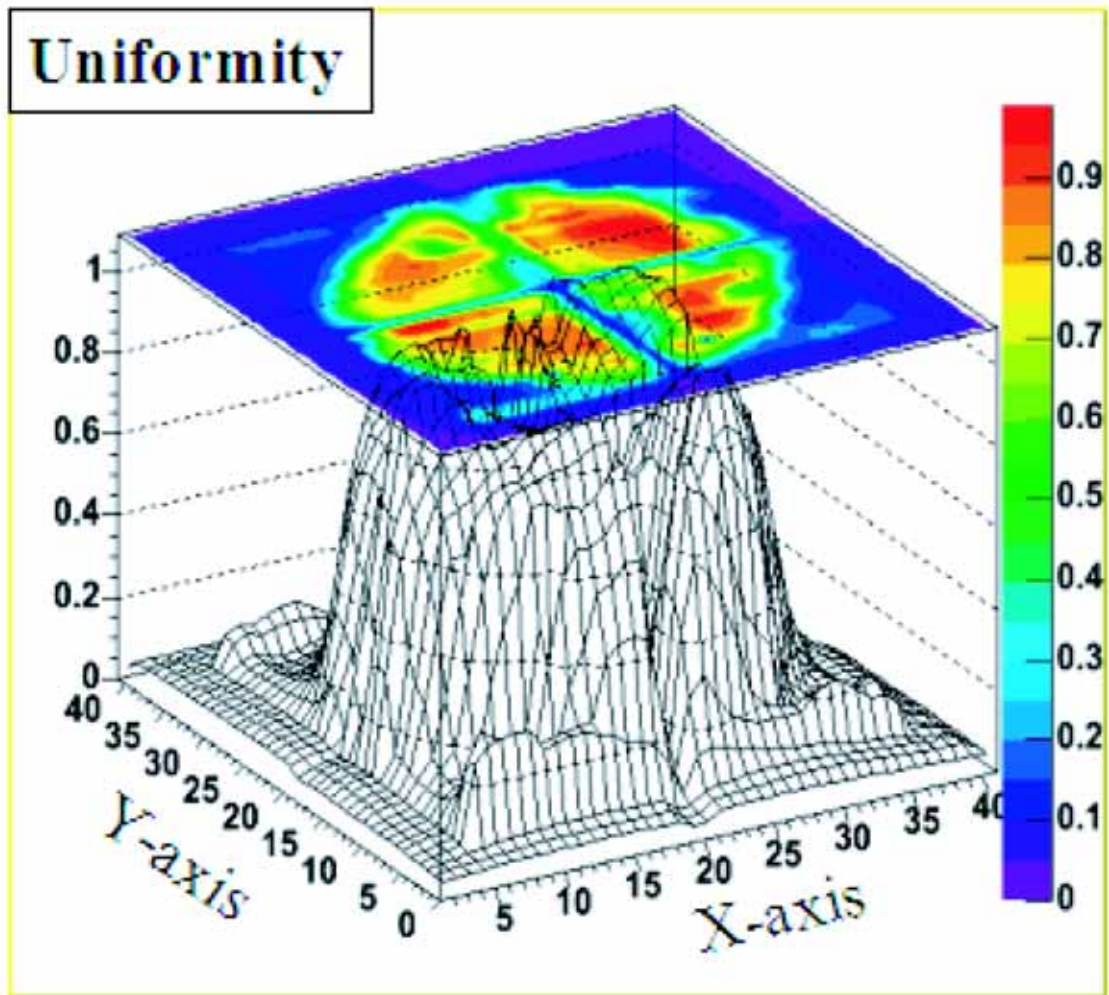


図 3.10: HAPD の Uniformity 観測

第4章 HAPD信号処理用回路の開発と評価

前章で述べたようにHAPD自体は、一般的な光検出器と比べると利得が低く、読み出しには高利得、低雑音の増幅器が必要となってくる。現144chのHAPDのみであっても全チャンネルの同時読み出しを前章のように市販の増幅器を使用して読み出すのは難しい。さらに実際使用するA-RICH Counterでは144 ch/HAPDを700台し計十萬チャンネルの読み出しを行う予定である。これらの読み出しにおいて我々はHAPD用多チャンネル信号処理用ASIC(Application Specific Integrated Circuit)を開発した。本章ではその開発の経緯、構成、評価に関して説明する。

4.1 ASIC構成概念と試作

4.1.1 構成概念

実際にHAPDを700台用い十萬チャンネルもの読み出しを処理することを考えると、

- 設置空間の問題
- HAPDの利得が小さいので、読み出しには全ての信号チャンネルに増幅器が必要
- 次の事象の発生までにすべての信号を処理しなければならない。
- 発熱の回避

の4点が課題にあげられる。実際にA-RICHが設置される場所であるEndCapでは設置空間が限られており、一つの信号を波高値で処理していたのでは膨大な信号ケーブル要求することとなり、また10万チャンネルの

処理に多大な時間が必要となってくる。これは好ましくない。RICHは輻射体から放出されたチェレンコフ光の「位置情報」から放出角を再構成し、粒子を特定するものである。すなわち重要な情報となってくるのは「HAPDのどの位置に光が当たったのか」ということである。そこでHitがOnもしくはOffを判定し、Bit化された出力のみをだすような処理回路を付け加える。こうすることで高いイベントレートに対応し設置空間を節約することができる。また外部からの読み出しが始まるまで信号を保持しなければならないのも必須項目である。すなわちこの回路は信号増幅部である Analog 部と信号を処理し、保持するデジタル部そして電源ラインの計3段をもつことになる。図4.1に1チャンネルに関して読み出しの流れにおける概念図を示し、今回の試作において設計したSignalの流れと構成に関して以下に説明する。



図 4.1: Signal 処理の流れ

4.1.2 アナログパート

ASIC 処理におけるアナログパートの主目的は、HAPDの前置増幅器として信号を処理し次のデジタルパートへ繋げる事にある。回路は一般的な検出器構造を参考として作られており、計3段の増幅段からなる。図4.2

にこの度の試作において構成されたアナログパートにおける回路ブロックを示す。

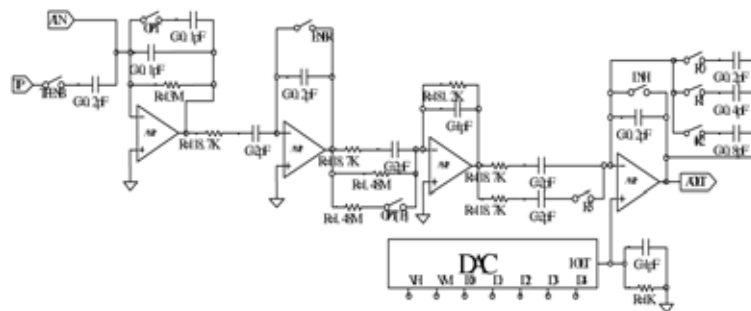


図 4.2: Analog 回路ブロック

前置増幅器

増幅初段として前置増幅器が配置し、これは電荷積分型の前置増幅器であり、 10V/pC と 5V/pC の二つの増幅率を選択できるようになっている。

整形増幅器

第二段は整形増幅器である。整形増幅器の前に設置されている付加回路は、Pole-Zero キャンセレーション回路、そして非反転増幅器である。前者は前置増幅器の減衰時定数を短縮する効果がある。後者は後段増幅部及びデジタル回路への雑音対策の為に設置している。

可変利得増幅器

HAPD の利得が低い事を受け設置した、可変利得増幅器である。外部スイッチにより 1.25 ~ 20 倍の範囲で利得を調整できる。さらに付随した OFF-SET 調整用回路により出力される信号を -160 mV ~ 150 mV の範囲で調整することが出来る。

4.1.3 デジタルパート

デジタルパートではアナログパートを通った有意な信号に対して処理を施し出力をデジタル化する。さらに信号読み出しに際して、Signal 情報の保持、Signal 処理中の Analog 出力の禁止、等の制御を担当する。アナログ増幅回路直後の信号処理回路として、必要なデータを効率良く収集するためにビット化処理を行うコンパレータ回路と、得られた信号がこちらの期待するイベントに因るものなのか判断するための時間だけデータを保持できるように設けられたシフトレジスタ回路による構成となる。コンパレータ回路群では、各チップごとに印加されることとなる閾値電圧が参照用の電圧として送られており、増幅回路における最終段出力値が閾値電圧を越えた時点でビット信号を出力するようになっている。シフトレジスタ回路では、コンパレータ回路より送られてくるビット信号から、トリガー出力信号を生成するようになっている。また、コンパレータ回路からのビット信号は 16 個の DFF(D-type flip-flop) 回路によりチップ動作周波数の 16 周期分ビット信号が保持するようになっている。チップ動作周波数は $1 \sim 10$ [MHz] を想定している。よってシフトレジスタ回路は、約 $1.6 \sim 16$ [μs] だけデータの保持が可能となっている。

4.2 ASIC 開発の経緯

今回私が試作・評価した HAPD 信号処理用 ASIC は third version (チップ名: "S03") である。A-RICH のための ASIC 試作としては 2004 年に First Version ; "S01"、そして同年 Second Version ; "S02" が試作されている。S03 の試作に関して 'S01' 'S02' でどのような点が問題になったのかを以下に述べる。

4.2.1 S01 での問題点

"S01" は 2004 年に HPD (APD ではなく PD を配置した物) 処理用 ASIC として、図 4.1 の概念を持って、始めて試作されたものである。'S01' で問題になった点は 2 つある。

- 一つの Channel あたり OFFSET が大きい

Analog 入力が DC 結合であったため各 Channel 間の OFFSET 大きく調節範囲を超えていた。

(4.3 参照)

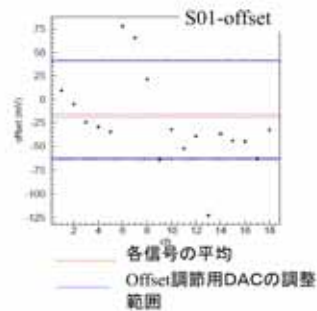


図 4.3: S01-OFFSET

- アナログ-デジタル間で信号の干渉がある。

パッドに使用されている静電保護用トランジスタのソース - ドレイン間を通じて、デジタル回路からアナログ回路への干渉が雑音として寄与していた。

4.2.2 S02 での問題点と改良

”S02” は’S01’ の問題点を改良した Version. として 2004 年に試作された。’S01’ から’S02’ へのより詳しい詳細に関しては 2004 年度の当研究科・関貴之氏の修士論文を参照されたい。

しかし’S02’ でも幾ばくかの問題が浮上してきた。それは主として「検出器容量による出力波高・電子雑音・電源感度の依存性」という問題である。以下に S02 における測定より問題となった点、及びそれに対する対策をまとめる。

- S02 での電子雑音のレベルが $C_d = 80pF$ において設計上 $1800[e]$ の所 $4000[e]$ と大きすぎる。(図 4.2.2 参照)

トランジスタ用バイアス回路にしミラー容量を追加する事で高周波雑音の低減を行った。さらに Noise が電源系統から回り込んでいる可能性を疑った。図 4.4 に変更した回路図を示す。

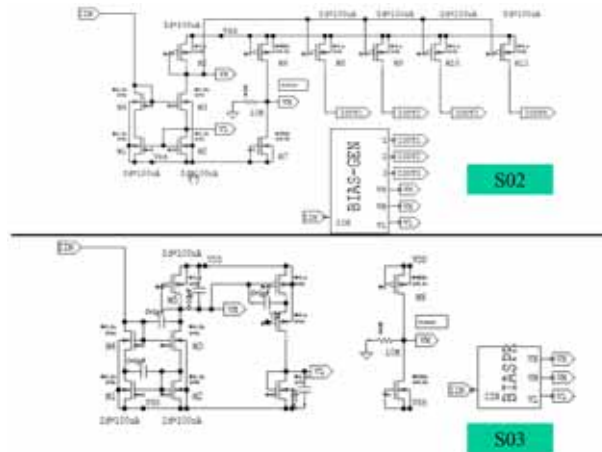


図 4.4: S02、S03 における BIAS 回路

- 検出器容量が増大するにつれ、VDD、VSS 変動に対する感度が低周波側へ著しく拡大する。(図 4.9 参照)

トランジスタ用バイアス回路に対電源レベルに向けて 10 pF の容量を入れることにより電源変動に対する対策とした (図 4.4 参照) そしてプリアンプ回路のトランジスタのゲート電圧に MOS トランジスタを用いた RC 回路を追加させることにより安定化した。(図 4.22 参照)

- 検出器容量の増大に伴い出力波高が減少する。(図 4.11 参照)
これは前置増幅器におけるオープンループゲインが足りないことが原因であった。

$$GAIN = \sim \frac{Z \times I \times Au}{1 + Au} \sim Z \times I$$

が成立するためには Au が十分大きい必要がある。ここで

$$u = \frac{R_s}{R_f + R_s} \frac{\frac{1}{C_s}}{\frac{1}{C_f} + \frac{1}{C_s}} = \frac{C_f}{C_f + C_s} \frac{0.1}{C_s}$$

A ; オープンループゲイン
 C_s ; 前置増幅器の帰還容量
 C_f ; 前置増幅器に繋がっている検出器容量

である。そのため A が十分大きくなくては、検出器容量に対し GAIN が異なり波高値が違ってくるのである。

このために S03 ではゲインブースト回路を付け加えた。図 4.22 に変更した回路図を示す。これはカスコードトランジスタのソース側のインピーダンスを低下させ同時にドレイン側のインピーダンスが高くなる結果増幅器全体の利得が高くなるような回路である。

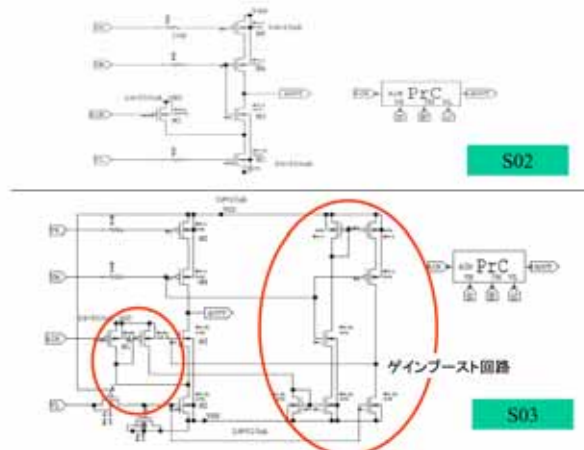


図 4.5: S02、S03 における前置増幅器回路

- オフセット調整が S02 ではほとんど効いていない。
 オフセット調整用 DAC 回路のバイアス線を変更した。オフセット ADJ 信号生成用の負荷抵抗を 20 k から 1 k へ変更した。図 4.6 に変更箇所を示す。
- HAPD の測定結果から Shaping time は短くしておいた方が柔軟性がある。整形時定数を $0.3\ \mu\text{s}$ $2.0\ \mu\text{s}$ までに変更した。

これらの対策の効果について Tanner 社の回路シミュレータ”T-SPICE”を使用したシミュレーション結果を (図 4.12 ~ 4.15) に示す。

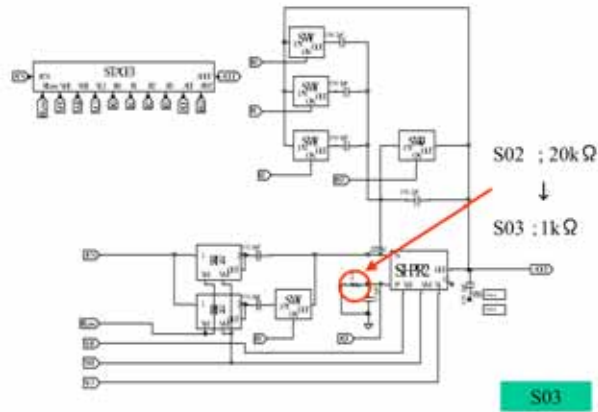


図 4.6: S02、S03 におけるオフセット ADJ 生成用負荷抵抗

4.3 IC 製造プロセス

HAPD 用 ASIC 製造にあたり、我々は CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) を用いた。実際の作成には東京大学大規模集積システム教育センター (VDEC) のマルチチッププロジェクトを利用し、ローム株式会社の製造プロセスで作成した。

CMOS 0.35 [μ m] (ローム株式会社)

- PolySi : 2 層
- メタル配線 : 3 層
- 電源電圧 : 3.3 [V]
- サイズ : 4.93 × 4.93 [mm²]
- 信号ピン数 : 144
- パッケージ : セラミック QFP160

また設計した回路を IC 化するには、IC レイアウトを作成する必要がある。この作業は、作成した回路構成を IC 化する際に必要となる露光マスクを設計するものである。この作業はデジアン社に依頼した。図 4.16 は実際に作成されたレイアウトである。

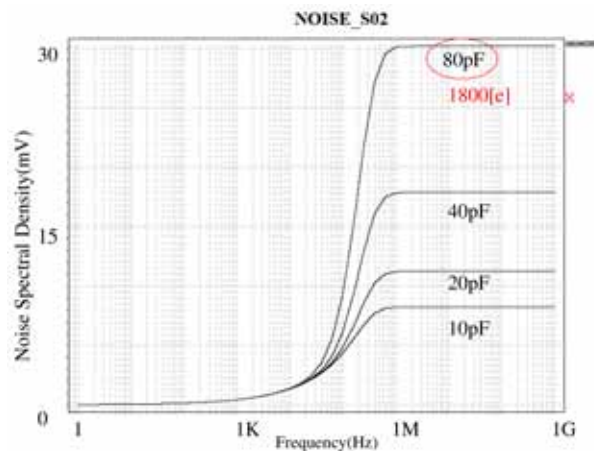


図 4.7: S02 における NOISE のシュミレーション値

4.3.1 作成された IC と要求仕様

図 4.17 に作成した IC の写真を載せる。この IC を作成するに当たり、我々が要求した仕様は表 4.1 のようなものになる。

4.4 測定

ASIC+HAPD を使用して、光を検出する前にテストパルスを用いて ASIC 自体の性能評価を行った。その結果を以下に示す。測定項目は下記のとおりである。

- テストパルスによるアナログ信号とデジタル信号の取得
- Threshold Scan について
- 線形性
- 雑音レベル
- 改良点の確認

測定結果を示すにあたり、測定のセットアップを示す。ASIC は LVDS 信号により制御するように設計しており。LVDS 信号を入出力する機構が必要となってくる。本測定では ASIC デジタル制御用モジュールを試作し測定に当たった。下記にセットアップの概念図と実物の写真を示す。

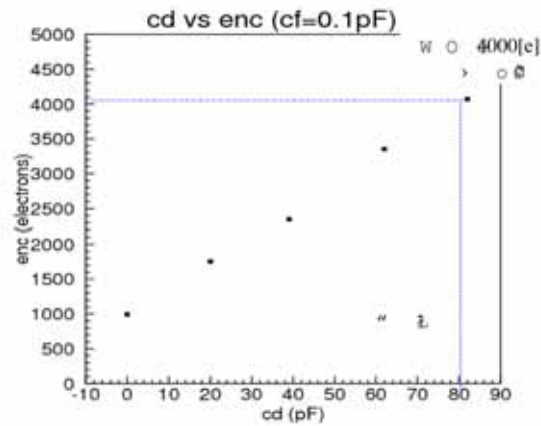


図 4.8: S02 における NOISE; 計測値

- Analog、Digital 信号の取得

ASIC を使用するに当たって、まず設計通りに信号が流れているか確認する必要がある。そこでテストパルスを用い信号の流れを確認した。またアナログパートでは次のデジタル処理が始まり、終了するまで VETO 信号が入り、出力がなくならなければならない。図 4.22 ~ 4.27 にアナログ出力におけるシュミレーションとオシロスコープによる写真を示す。テストパルスは HAPD 換算で $2pe[24000[e]]$ を入射した。前置増幅器から最終利得増幅器までの各出力をシュミレーションにおける波形及び波高を比べた結果。そのずれは最大で 10% 程度である。表 4.2 に各波高値の値を示す。これらの測定により、3 段からなる増幅段は問題なく作動しているといえる。

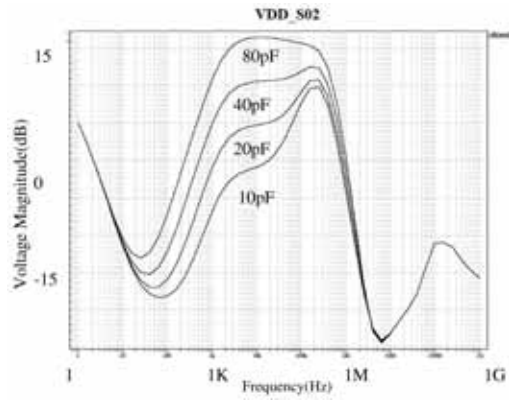


図 4.9: S02 電源系統の検出器容量依存性 ; VDD

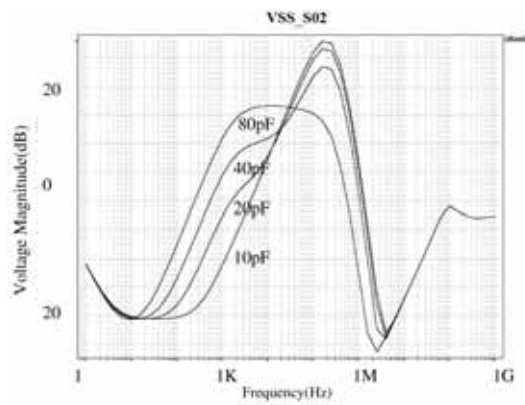


図 4.10: S02 電源系統の検出器容量依存性 ; VSS

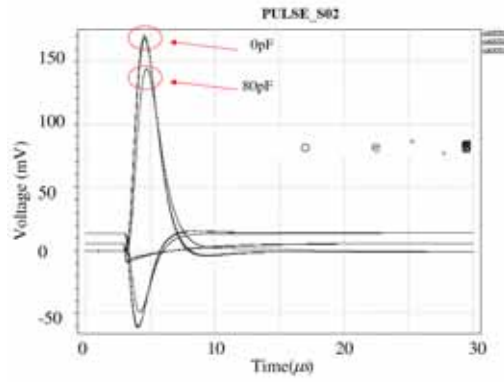


図 4.11: S02 出力波高の検出器容量依存

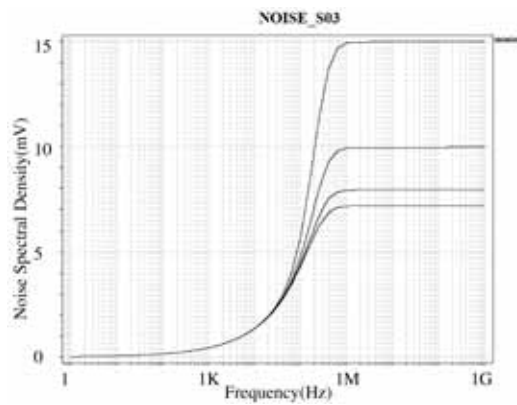


図 4.12: S03 における NOISE のシュミレーション値

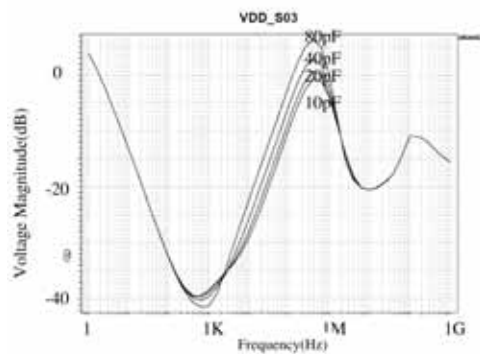


図 4.13: S03 電源系統の検出器容量依存性 ; VDD

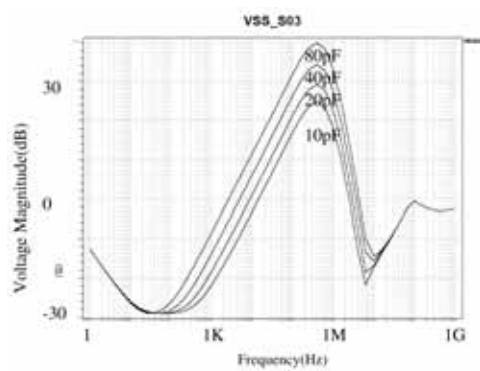


図 4.14: S03 電源系統の検出器容量依存性 ; VSS

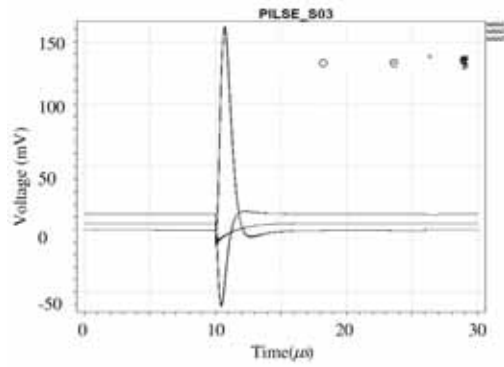


図 4.15: S03 出力波高の検出器容量依存

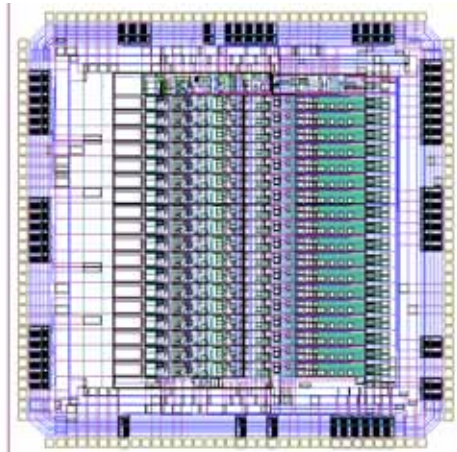


図 4.16: S03 のレイアウト



図 4.17: IC の要求仕様と写真

ASIC への要求仕様	
雑音レベル	1200[e]@80pF
標準入力信号	12000[e]
閾値調節範囲	-1.3 ~ 2.0 [V]
チップ当たりの実装チャンネル数	18 [channel/chip]
読み出し方式	シリアル・デジタル
制御方法	LVDS を信号とする 8bit 制御
S/N 比	10.0
ヒットレート	10 [kHz/channel]
トリガーレート	5 [kHz]
消費電力	50 [mW/channel]

表 4.1: ASIC への要求仕様

	オシロスコープによる測定 [mV]	シミュレーション [mV]
前置増幅器	16	18
整形増幅器	70	80
最終利得増幅器	160	160

表 4.2: 各増幅段における波高値

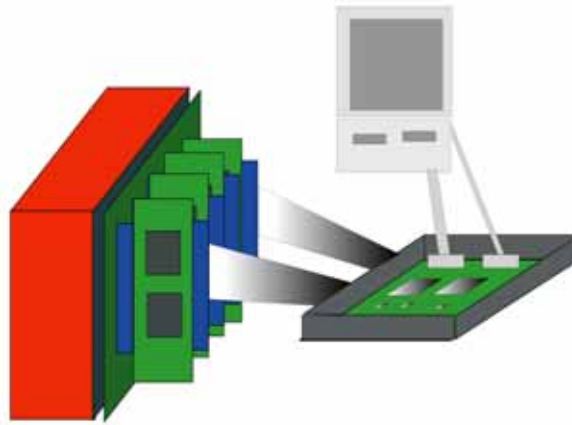


図 4.18: 概念図



図 4.19: アナログボード写真



図 4.20: デジタルボード写真



図 4.21: S03:前置増幅器測定

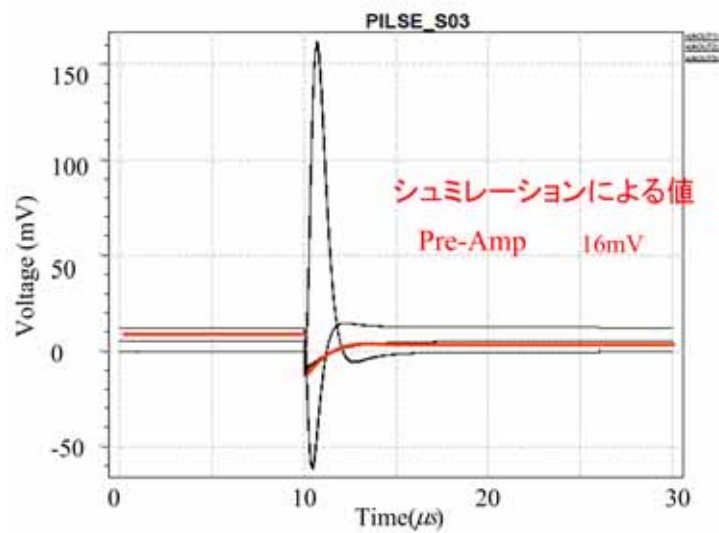


図 4.22: S03:前置増幅器シミュレーション

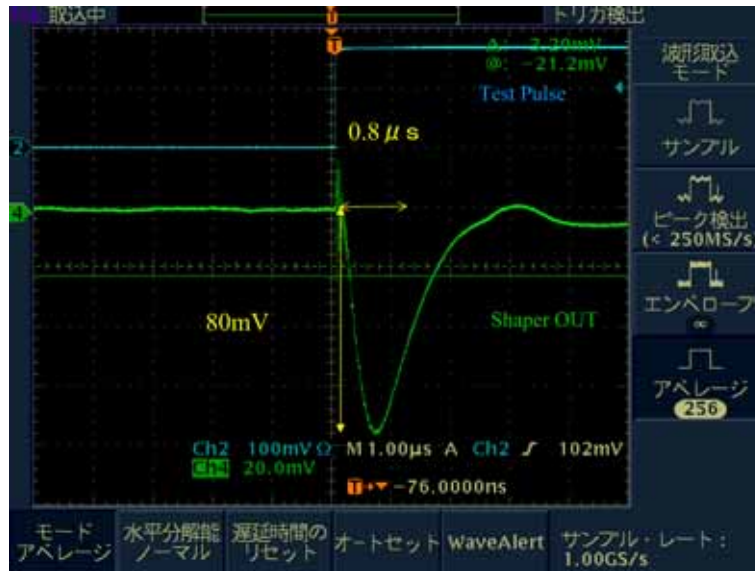


図 4.23: S03:整形増幅器測定

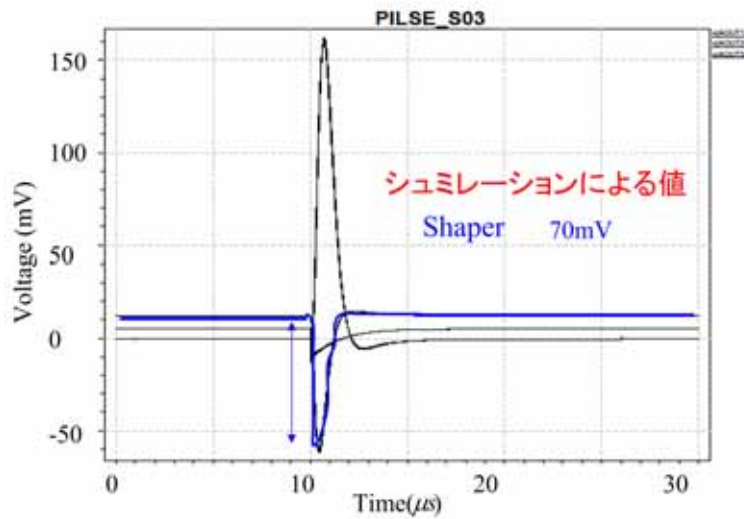


図 4.24: S03:整形増幅器シミュレーション



図 4.25: S03:最終利得増幅器測定

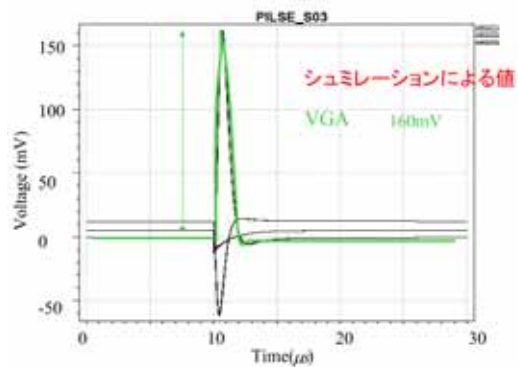


図 4.26: S03:最終利得増幅器シミュレーション

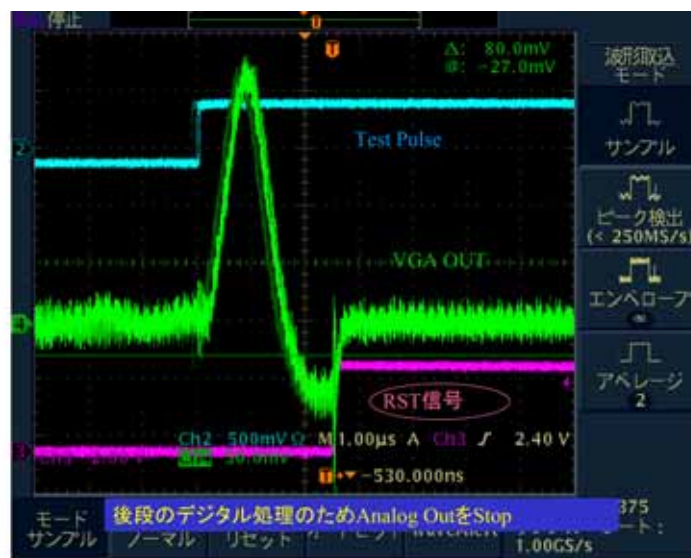


図 4.27: S03-VETO 信号

次にデジタルパートの出力を確認した。デジタルパートではアナログ最終出力信号に対しある Threshold 以上の信号が来たときデジタル化された信号を出す。図 4.28 はオシロスコープによる実測である。

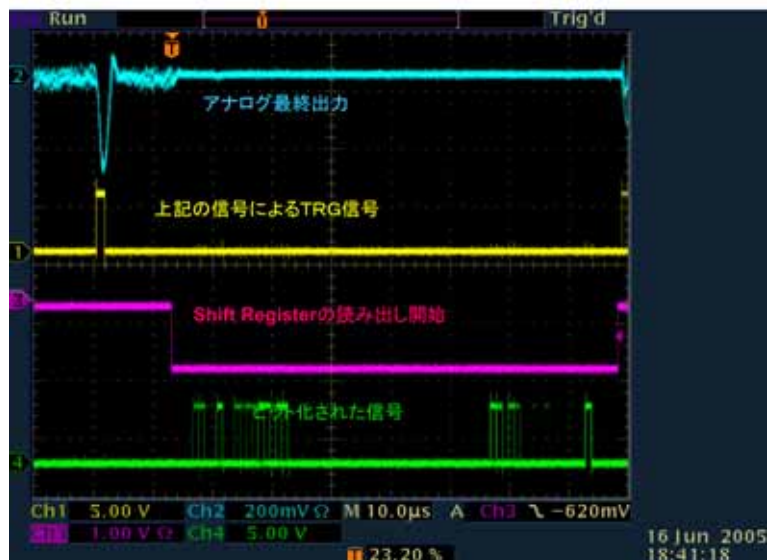


図 4.28: S03 デジタル出力

これらの事から、Signal は我々の設計通りに出力されているといえる。次により具体的な評価に入る。そこで Threshold Scan と呼ばれる測定を行うことにより、波高分布における、Mean と Sigma を見積もることが出来る。以下に概念を示す。

- Threshold Scan

S03 では出力信号はデジタル化された信号のみである。性能評価としては入力された信号に対する波高分布が欲しい所である。S03 ではある閾値電圧を超えた信号をデジタル化し出力する一方で、信号はガウス分布に従っている。すなわち Bit 化された出力の頻度は、ガウス分布において閾値電圧以上が得られる確率に等しく。これはガウス関数の面積に他ならない。すなわち閾値電圧と Bit 出力の出力割合の関係から波高分布を見積もることができる。図 4.29 に実際に行った Threshold Scan の実例を示す。

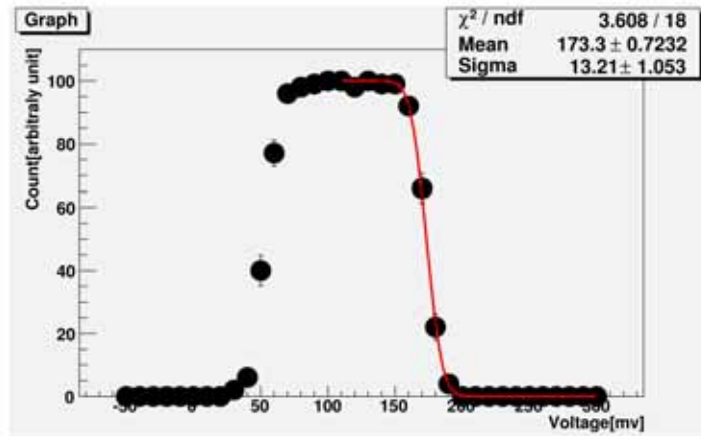


図 4.29: 閾値電圧とトリガー信号の出力割合

以降の測定では Threshold Scan による測定結果である Mean、Sigma を用いている。

- 線形性

2 光子相当の電荷量をテストパルスを用いて入力し ASIC の線形性を測定した。結果として 0.5 光子より上の範囲で線形性が保たれている。
- 検出器容量依存性

2 光子相当の電荷量をテストパルスを用いて入力し ASIC の容量依存性を測定した。図 4.31 は各容量に対する Threshold Scan の Mean をグラフ化したものである。結果、s02 で容量の増加に伴い Peak が下がっているのに対し、S03 では設計どおり下降が抑えられている。0 pF 付近で急激にグラフが上昇しているのはゲインブースト回路による副作用である。
- 雑音レベル

S02 と S03 の雑音レベルを比べた。用いたテストパルスは 2pe である。S02 で 4000[e] 相当の雑音が出ているのに対し、s03 では 2000[e]

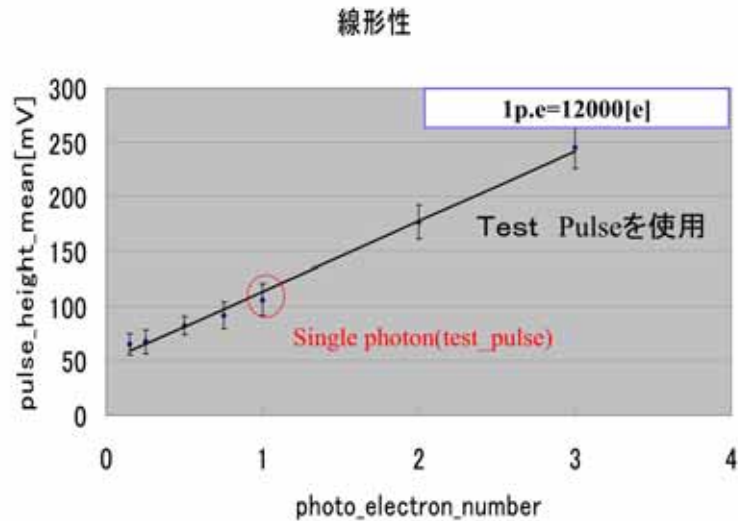


図 4.30: 線形性

と抑えることが出来た。しかし設計段階での雑音よりは大きく、これは周辺雑音及びゲインブースト回路によるためと思える。ここでも 0 pF 付近で急激に雑音が増えているのはゲインブースト回路による発振のためである。

- チャンネル間 OFFSET 及び OFFSET 調整

チャンネル間 OFFSET 測定及びその調整を行った。ASIC では各チャンネル毎に設けられている Comperator 回路の閾値電圧は ASIC 全体で一つとしてでしか設定できない。そのため各チャンネル毎に OFFSET があまりにも違うと、測定に使える Ch が限られてくる。全 S01 では各チャンネル毎のバラつきが大変大きく、S02 では OFFSET 調整が聞くにくかった。今回 S03 では OFFSET 調整範囲は $-160[mV] \sim 150[mV]$ の範囲で $10[mV]$ 範囲で調整が可能である。図 4.33 に OFFSET 調整用 DAC の線形性を図 4.34 に OFFSET 調整前と調整後の各 Ch 毎の Mean を乗せる。結果全 ASIC の問題点は解消されていると言える。

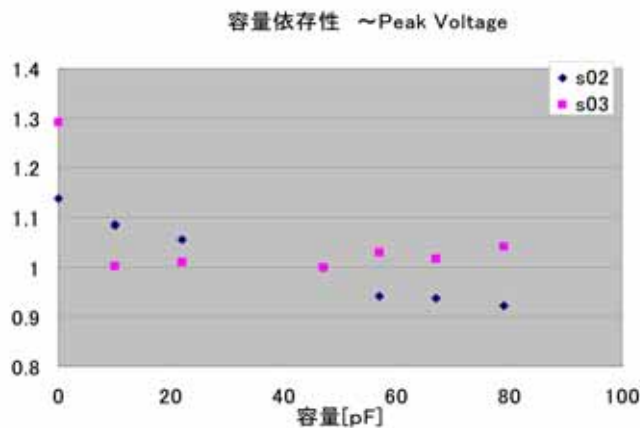


図 4.31: ピーク波高の検出器容量依存性 : S02 vs S03

4.5 S03 における問題点

測定において S03 における問題点が発覚した。以下に問題点を述べる。

- ゲインブースト回路による発振
 ゲインブースト回路は前置増幅器においてオープンループゲインをあげる目的で S02 から新しく付け加えられた回路である。しかし副作用として検出器容量の低下に伴ってゲインブースト回路が安定する Band-width を逸脱する。現象が見られた。(図 4.32)

観測によると 22pF の容量以降から安定な動作を示す (4.32 参照)。前述の測定では測定に用いない Ch は擬似容量をつけてある。

実際の HAPD による測定では、HAPD の検出器容量は 80pF なので、問題とはならない。
- 読み出し時間について
 今回試作された ASIC[S03] では回路の安定化を図るために前置増幅器のバイアス回路に非常に大きな RC 回路を設置した。図 4.35 に S03 における前置増幅器回路図を示す。図中赤丸のトランジスタが RC 回路を構成している。このため回路が安定に動作するまでの充

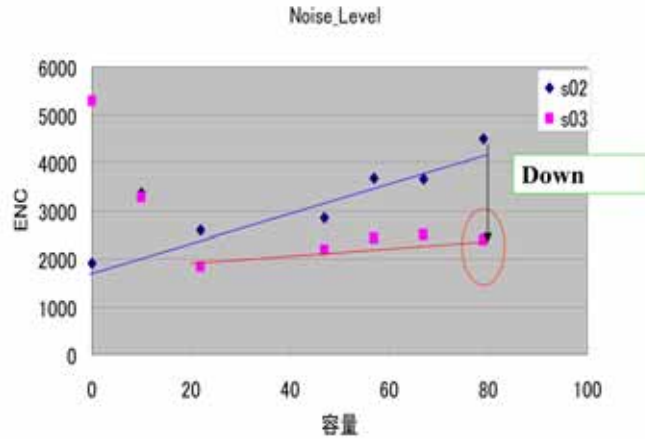


図 4.32: 雑音レベル : S02 vs S03

電時間が必要となってくる。そこで安定な動作をするための目安の時間が必要となってくる。試作された Chip を無作為に 2 個選択し、安定な動作を得るための入力時間を調べた結果を??に示す。

これから入力時間を 60 分以上を決定した。後述の測定では、この時間を目安として十分時間がたった後の結果を示している。

4.6 HAPD との接続

S03 におけるテストパルスを用いた性能試験において、HAPD との接続したとき十分 1 光子の観測が出来る程度であることを前節で確認した。次に実際の接続試験について述べる。

4.6.1 測定目的

- HAPD + ASIC での雑音レベル (アナログモニターによる)

HAPD では逆バイアス印加時に検出器として 80pF 程度になると予想されている。しかし実際にそうであるとは限らない。また HAPD

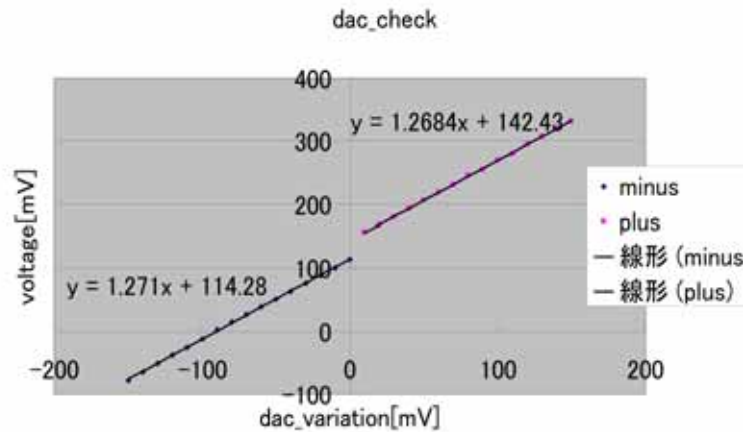


図 4.33: OFFSET 調整用 DAC の線形性

からの漏れ電流による雑音の増加も予想される。そこで測定により確かめる必要が出てくる。今回の測定ではアナログモニターを使用しオシロスコープと ADC による測定を行った。

- HAPD + ASIC での信号の観測 (アナログモニターによる)

HAPD + ASIC で LED 光による観測を行った。読み出しを含め、十分な 1 光子を観測でき、且つ位置情報を出力できれば、A-RICH のための光検出器システムとしてテストベンチが出来上がったことになる。しかし S03 用制御ボードに付属するアナログモニターでは 1 チャンネルしか読むことが出来ないため、今回の測定では多チャンネル同時測定は行っていない。図 4.37 に測定のセットアップを示す。

- 2005 年 12 月に我々はビームテストを行った。

ビームテストによりエアロゲルからの Chrenkov 光を検出できるかが A-RICH 検出器として最大の目的である。

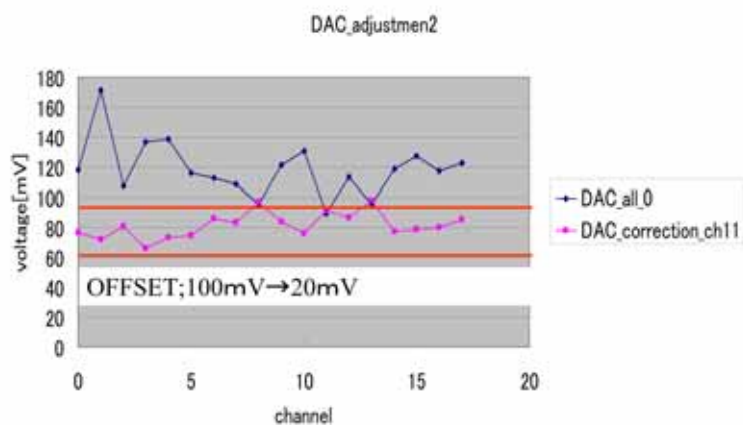


図 4.34: OFFSET 調整による値の調整

4.6.2 結果

図 4.39 にオシロスコープによる写真と ADC での測定結果を示す。ADC としては Amptek 社の MCA8000A を使用した。結果 1 光子と 2 光子を観測することが出来た。しかし問題点も観測された。雑音とのシグナル分離度の点でテストパルス使用時と比べると著しく悪くなっている。またオシロスコープでの写真が示すとおり逆極性への出力と極めて大きな信号がある。これは HAPD の接続による、漏れ電流による雑音の増加だけでなく HAPD 固有のスパイク雑音による影響が関係していると思われる。今後詳しい考察が必要になってくる課題である。

- ビームテストの結果

現時点での解析結果のプロットを図 4.40 に載せる。結果は全体に Noise と思われる反応があり、チェレンコフ光によるリングイメージは見えていない。おそらく BeamTest 時に他の検出器群との兼ね合いから ASIC に多大な Noise が乗ってきていたためだと思われる。これに関して今後さらに解析を進める必要がある。しかし光に対して反応が無いわけではない、図 4.41 に HAPD にビームを当てた場

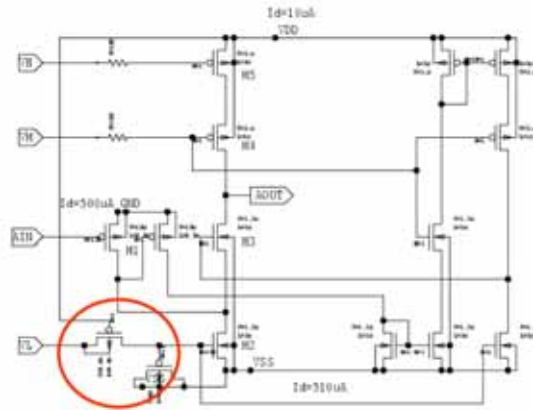


図 4.35: S03 における前置増幅器回路図 2

合と Clock ジェネレータによるペDESTAL によるグラフを示す。これによると 150[mV] 以降で Pedstal と分離した反応が見られている。

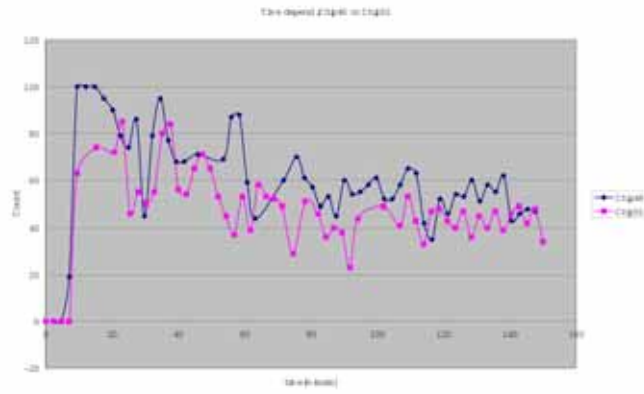


図 4.36: S03 における充電時間

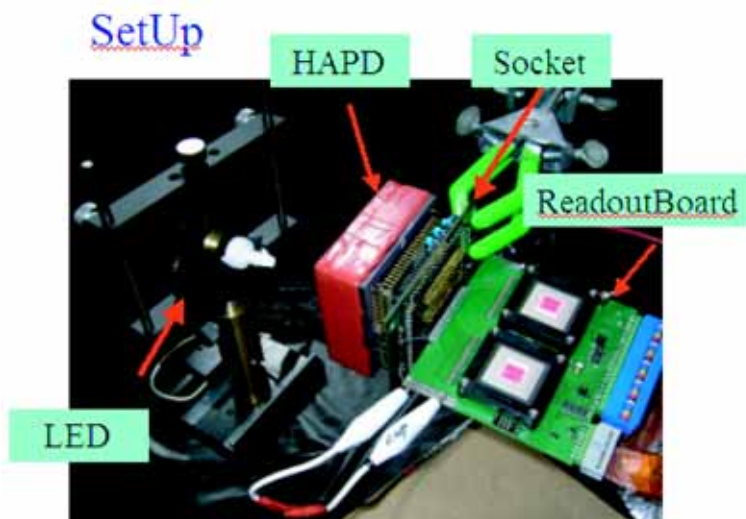


図 4.37: HAPD+ADIC の Setup

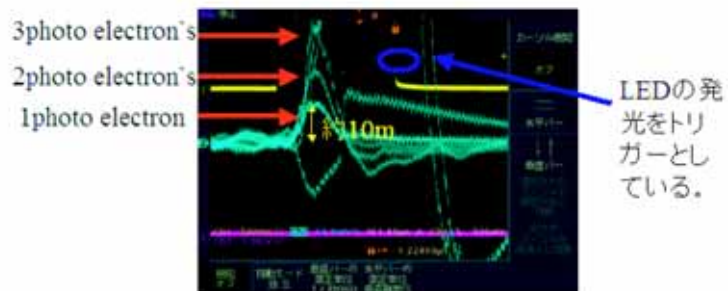


図 4.38: オシロスコープによる写真

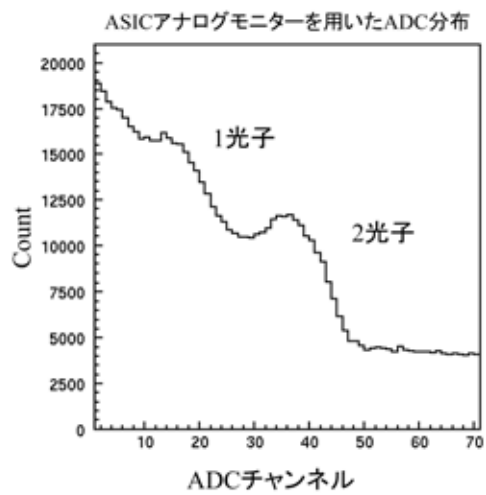


図 4.39: ADC 分布 : Pedstal により規格化

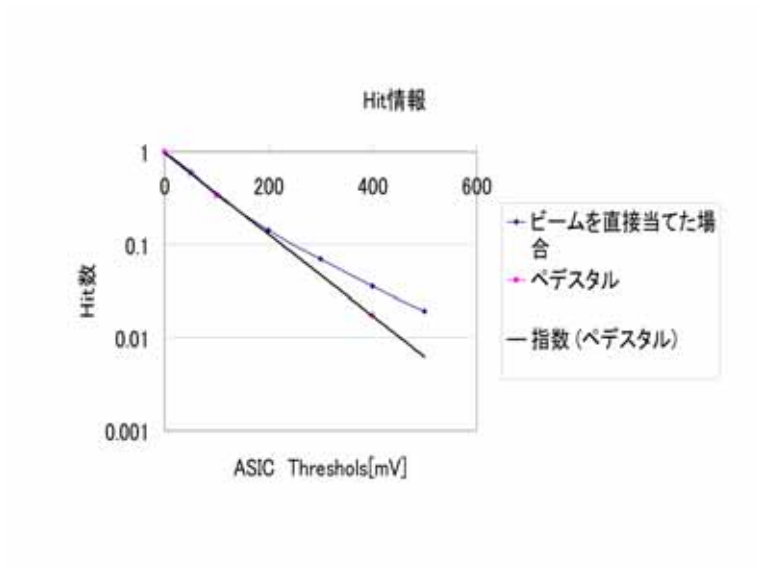


図 4.41: HAPD にビームを当てた場合とペDESTAL

第5章 結論と今後

5.1 HAPD

HAPD はまだ試作が始まったばかりである。HAPD は時間分解能、位置分解能、の点で優れた性能を示すが、APD を安定に用いる事に技術的な課題が残っている。今回の測定において正負逆バイアスにおける 1 光子を観測することが出来た。しかし、S/N 及び Uniformity の点ではあまりよろしくなく今後の課題となる。

5.2 ASIC

ASIC に関して、旧 Version である S02 の問題点をクリアし、HAPD との接続により光を検出することが出来た。これによって ASIC + HAPD というテストベンチを作成することができた。しかし予想よりもはるかに雑音が乗ってきており、フォトンカウンティングは難しい状況である。今後はさらに深い Study が必要となってくる。さらに S03 を使用するに当たり問題点もいくらか浮上してきた。特にゲインブースト回路による発振は考慮すべき問題である。第 4 回目の試作 'S04' においてこの問題を回避する設計を行い、2006 年 3 月へ ASIC 作成機関である VDEC への Submit が予定されている。

謝辞

本研究を行うにあたり様々な方にお世話になりました。この場を借りて、感謝念をお伝えしたく思います。

まず私の担当教官であり、Belle 実験へ参加する機会を与えてくださいました、東京都立大学の住吉孝行教授に深く感謝しております。

そして宇宙航空研究開発機構の池田博一教授には実験のご指導を頂き、数多くの助言を頂いたことに深く感謝しております。

また多くの助言・示唆をくださった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、海野祐二研究員、東京都立大学の関孝之氏に深く感謝しております。特に西田昌平助手、関孝之氏には実際に実験のご指導を頂きました事を感謝しております。

浜松ホトニクス社の深澤宏仁氏には HAPD の作成、データの取り方等、数多くお世話になりました事を深く感謝しております。同じ実験に所属し苦楽を共にした、千葉大学の福島友和氏、田端誠氏、倉谷厚氏、名古屋大学の小酒井良延氏、馬塚優里氏、東邦大学の岩淵信也氏、昨年度東京都立大学を卒業された山本俊吾氏、松本隆博研究員にも感謝しております。

そして研究室での生活を支えてくださいました、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。

同じ研究室に所属し、2年間を共に歩ませて頂いた、神谷好朗氏、梶祐二氏、李栄篤氏、大田理氏、そして同じ学年であり、研究生活を楽しいものとしてくれた、渡邊勇介氏、佐久間清美氏、鶴崎一磨氏にも深く感謝いたします。最後に私を大学院に進学させてくださり、生活を支えてくださった家族と友人たちに心より感謝いたします。

参考文献

- [1] 小林 誠 消えた反物質 講談社

- [2] 三田一郎 失われた反世界 C P 対称性の破れ 講談社

- [3] 山本俊吾 東京都立大学 修士論文 (2004)

- [4] 小酒井良延 名古屋大学 修士論文 (2004)

- [5] 関孝之 東京都立大学 修士論文 (2003)

- [6] H.IKEDA, Electronics for Particle Measurement, KEK Report 2002-8

- [7] Motohiro Suyama, The Graduate University for Advanced Studies
Doctor Thesis(2002)

- [8] T.Matsumoto et.al., Study of proximity focusing RICH with an aerogel radiator using flat-panel multi-anode PMTs(Hamamatsu H8500),
Nucler Instruments and Methods in Physics Reserch A, 2004