

2009年度修士学位論文

Belle II実験の為の
Aerogel RICH検出器用読み出し電子回路の開発

首都大学東京大学院 理工学研究科

物理学専攻 修士課程2年

08879315 黒田英諒

概要

Belle 実験は B 中間子における CP 対称性の破れを観測し、小林・益川理論の検証を行なう事を目的として 1999 年より開始された実験である。Belle 実験では、電子・陽電子衝突型加速器 KEKB を用いて B 中間子・反 B 中間子対を大量に生成し、それらの崩壊事象を Belle 測定器によって詳細に観測する事で CP 対称性の破れの検証や新しい共鳴状態の発見等、数々の成果を挙げてきた。これらの結果には標準モデルを超えた新しい物理を示唆する結果も含まれているが、新しい物理の証拠と言える程の精度での結果には至っていない。この新しい物理を示唆する結果の更なる検証、新しい物理を含む崩壊事象を観測する為に Belle 実験の後継実験として Belle II 実験が計画されている。Belle II 実験では Belle 実験よりも更に高いルミノシティの加速器 SuperKEKB と更に高精度な Belle II 測定器を用いて新しい物理を含む稀少な事象を余す事なく検出する事を目標としており、そのために検出器・加速器のアップグレードが進行している。

Belle 実験、Belle II 実験では稀崩壊事象の検出や崩壊前の B 中間子のフレーバーの同定の為に、K 中間子と π 中間子の粒子識別が欠かせない。Belle 実験では K/ π 粒子識別を CDC(Central Drift Chamber)、TOF(Time-Of-Flight Counter)、ACC(Aerogel Cherenkov Counter)で行なっている。この内、ACC は高運動量領域での K/ π 粒子識別を担っているが、Belle 測定器の endcap 部においては、空間的制約により低運動量領域での K/ π 粒子識別を担っている TOF の搭載が困難であった為、ACC のみで比較的低い運動量領域での K/ π 粒子識別を行なっている。しかし、Belle II 実験で新事象を含む稀崩壊事象を検出する為には、統計量を稼ぐ必要があり、endcap 部でも高運動量領域の K/ π 粒子識別を行なう事が求められる。そこで、endcap 部での粒子識別能力向上に向けて、新たな K/ π 粒子識別検出器として Aerogel RICH(Ring Imaging Cherenkov Counter) 検出器の導入を計画しており、開発を進めている。

Aerogel RICH 検出器は、荷電粒子が輻射体である aerogel を通過する際に発生するチェレンコフ光を光検出器でリング状に検出し、チェレンコフ光の放射角を再構成し荷電粒子の速度を導出する。この速度情報と他の検出器で得られる運動量情報から K/ π 粒子識別を行なう。このため、Aerogel RICH 検出器に用いられる光検出器は 1 光子程度であるチェレンコフ光を検出可能で、十分な位置分解能・

有効面積を持っている事が求められる。我々はこれらの要求を満たす光検出器として144チャンネルのHAPD(Hybrid Avalanche Photo Detector)を(株)浜松ホトニクスと共同で開発している。

HAPDは一般的な光電子増倍管と比較すると増幅率が低く、読み出しには高利得・低雑音の増幅器が必要となる。また、Belle II測定器にインストールする際には約500台のHAPDを使用する為、計7万チャンネルに及ぶ信号を同時に読み出す事が可能な読み出し電子回路が必要である。そのため、144チャンネルHAPDの信号読み出し電子回路をASIC(Application Specific Integrated Circuit)として開発している。また、柔軟な読み出しを可能にし、Belle IIのデータ収集システムの対応できるようにする為に、ASICからのデジタル信号の処理をFPGA(Field Programmable Gate Array)で行なう事を計画している。

本論文では、Aerogel RICH検出器の読み出し回路として開発されたASICの「SA-series」のSA01とFPGAを用いた読み出しシステムの動作検証とチャンネル数を増やした新ASICのSA02の性能評価について記述する。また、Aerogel RICH検出器の性能評価として2009年11月に行なったプロトタイプAerogel RICH検出器のビーム照射実験の結果についても述べる。

目次

概要	i
第 1 章 序章	1
1.1 序	1
1.2 物理的背景	2
1.2.1 CKM 行列と Unitarity Triangle	2
1.2.2 B 中間子における CP 対称性の破れの測定	4
1.2.3 Belle II 実験で探求される標準モデルを超える物理	5
第 2 章 Belle 実験	10
2.1 概要	10
2.2 KEKB 加速器	11
2.3 Belle 測定器	12
2.3.1 Silicon Vertex Detector(SVD)	14
2.3.2 Central Drift Chamber(CDC)	14
2.3.3 Time-of-Flight Counter(TOF)	14
2.3.4 Electromagnetic Calorimeter(ECL)	15
2.3.5 K_L/μ Detector(KLM)	15
2.4 Aerogel Cherenkov Counter(ACC)	15
2.4.1 K/ π 粒子識別	16
2.4.2 ACC の原理	18
2.4.3 Silica aerogel	19
2.4.4 ACC の粒子識別能力と問題点	21
2.5 Belle II 実験へのアップグレード	22
2.5.1 SuperKEKB	22
2.5.2 Belle II 測定器	23
第 3 章 Aerogel RICH 検出器	28
3.1 原理と構造	28
3.2 Aerogel RICH 検出器への要求	30

3.3	144 channel HAPD	31
3.3.1	HAPD の動作原理	31
3.3.2	Aerogel RICH 検出器の為の 144 channel HAPD	32
第 4 章	144 channel HAPD 読み出し ASIC	35
4.1	開発経緯と回路構成	35
4.1.1	ASIC の構成概念	35
4.1.2	S-series	36
4.1.3	SA-series	40
4.2	SA01	45
4.2.1	性能	45
4.2.2	ASIC と FPGA による HAPD 信号読み出し	47
4.3	SA02	54
4.3.1	SA01 からの変更点	54
4.3.2	Spice による検証	56
4.3.3	動作検証	57
4.3.4	小型のパッケージへの改良	62
第 5 章	ビームテストによるプロトタイプ Aerogel RICH 検出器性能評価	63
5.1	ビームテストの Set-up	63
5.1.1	Fuji test beamline	64
5.1.2	プロトタイプ Aerogel RICH 検出器	64
5.2	データ解析方法	69
5.3	過去 (2008 年) のビームテスト	71
5.4	ビームテストの結果	72
5.4.1	2008 年からの改良点と変更点	72
5.4.2	Threshold run	74
5.4.3	プロトタイプ Aerogel RICH の性能評価結果	74
5.4.4	SA01 と S04 の性能の比較	78
5.4.5	High QE の HAPD による性能向上の検証	80
5.5	中性子照射した HAPD での結果	80
5.5.1	リングイメージと角度分布	81
5.5.2	Shaping time Scan	84
5.5.3	Noise level	86
5.5.4	Threshold scan (HAPD 単体での評価)	88

第6章	まとめと今後	92
6.1	読み出し電子回路の性能評価について	92
6.2	ビームテストによる Aerogel RICH 検出器の性能評価	93
6.3	今後	93
	謝辞	94
	参考文献	95

目次

1.1	Unitarity Triangle	3
1.2	$B^\pm \rightarrow \pi^0 K^\pm$	5
1.3	$B^0 \bar{B}^0$ mixing	5
1.4	$B \rightarrow \phi K_s$ 崩壊	6
1.5	様々な崩壊での $\sin(2\phi_1)$	7
1.6	$b \rightarrow sl^+l^-$ 崩壊	8
1.7	Belle 実験での Forward-backward asymmetry の観測結果	8
1.8	$b \rightarrow s(d)\gamma$ 崩壊	8
2.1	高エネルギー-加速器研究機構と KEKB	10
2.2	KEKB 加速器	11
2.3	世界の衝突型加速器のルミノシティ	12
2.4	Belle 測定器	13
2.5	Belle 測定器内での ACC の構成	16
2.6	$\bar{B}^0 \rightarrow J/\Psi K_s$ の崩壊事象例	17
2.7	Cherenkov 放射	19
2.8	Silica aerogel の構造	20
2.9	ACC の K/ π 識別能力	21
2.10	TOP カウンターでのチェレンコフ光の観測	25
2.11	Belle II 測定器	26
2.12	Belle II 測定器と Belle 測定器	27
3.1	Proximity focusing A-RICH 検出器	29
3.2	Aerogel RICH 検出器の各要素の配置図	30
3.3	光電子増倍管の構造	32
3.4	HAPD の構造	33
3.5	144 チャンネル HAPD	33
4.1	S-series 回路構成	37
4.2	SA-series 回路構成	41

4.3	SA-series の増幅器後のアナログ信号	41
4.4	SA-series のコンパレータの入出力	42
4.5	パラメータ設定回路の構成	44
4.6	SA-series のチャンネル選択時の入力信号	44
4.7	SA01 の写真	45
4.8	SA01 の性能 (アンプの線形性、noise)	46
4.9	SA01 のテストボード (FPGA 搭載)	47
4.10	FPGA での hit 信号の処理	49
4.11	ASIC と FPGA を用いた HAPD 信号読み出し試験 Set-up	51
4.12	Threshold Scan の原理	52
4.13	1~2 光電子の光を照射した際のアナログ信号	52
4.14	Threshold scan 結果 (SA01 と FPGA 読み出し時)	53
4.15	2-dimensional Scan 結果 (SA01 と FPGA で読み出し時)	53
4.16	Cross-talk check(SA01)	54
4.17	SA02 の増幅器部分の SA01 からの変更点	55
4.18	SA02 の位相補償回路 simulation	56
4.19	SA02 の性能 (simulation 結果)	57
4.20	SA02 とそのテストボード	58
4.21	SA02 の線形性と増幅率	58
4.22	SA02 の noise	59
4.23	SA02 の offset 調節	60
4.24	SA02 の各チャンネルでの offset のばらつき	60
4.25	SA02 の Threshold scan 結果	61
5.1	Fuji test beamline	63
5.2	プロトタイプ A-RICH 検出器 Set-up	64
5.3	Aerogel の配置 (Same index と Focusing)	65
5.4	プロトタイプ Aerogel RICH 検出器 HAPD の配置	65
5.5	Belle II 測定器での光検出器の配置の概念図	66
5.6	S-series でのデータ読み出し	67
5.7	SA01 でのデータ読み出し	67
5.8	Offset 調節前後での Threshold scan 結果	68
5.9	チェレンコフ角度分布での N_{pe} 、角度分布、BG の導出	70
5.10	過去 (2008 年) のビームテスト結果	71
5.11	プロトタイプ Aerogel RICH 検出器	72
5.12	Threshold 電圧を変えた場合の N_{pe} と BG	74
5.13	扇型配置での HAPD の配置	75

5.14	HAPD のチャンネル毎の S/N 比の map	76
5.15	ビームテストの結果	77
5.16	1track でのリングイメージ	78
5.17	整列配置での HAPD の配置	78
5.18	中性子照射した HAPD を用いた場合の HAPD 配置	81
5.19	中性子照射した HAPD でのビームテストの結果	82
5.20	中性子照射した各 HAPD でのチェレンコフ角度分布	82
5.21	SHP112 の量子効率の一様性とチェレンコフ光の hit した位置	83
5.22	中性子照射した HAPD で整形時定数、time-window を変化させた時の角度分布	84
5.23	整形時定数、time-window を変化させた時の noise の減少	88
5.24	中性子照射量 $2.0 \times 10^{11} \text{n/cm}^2$ の HAPD での threshold scan 結果	89
5.25	中性子照射量 $5.0 \times 10^{11} \text{n/cm}^2$ の HAPD での threshold scan 結果と 1 光電子信号のオシロスコープ画像	90

表 目 次

1.1	Unitarity Triangle のパラメータと観測事象	4
1.2	Belle II 実験で鍵となる物理の測定精度	9
2.1	Belle 測定器の観測対象粒子	13
2.2	K/ π 粒子識別が必要な崩壊モード	18
2.3	Silica aerogel 等の物質の屈折率	20
2.4	SuperKEKB のビームパラメータ	23
2.5	Belle II 測定器での CDC の主要なパラメータ	24
4.1	S04 の仕様と動作検証結果	40
4.2	SA01 の仕様と動作検証結果	46
4.3	SA02 の仕様と動作検証結果	62
5.1	ビームテストで用いた Aerogel	73
5.2	ビームテストで用いた	73
5.3	HAPD の各 APD チップ毎の増幅率、Noise、S/N	76
5.4	ビームテストで達成された性能	77
5.5	SA01 と S04 の noise の比較	79
5.6	SA01 と S04 の検出光電数の比較	80
5.7	中性子照射した HAPD での BG と検出光子数	83
5.8	整形時定数、time-window を変化させた時の検出光子数と BG	85
5.9	整形時定数、time-window を変化させた時の noise	87

第1章 序章

1.1 序

今日の高エネルギー物理学では標準モデルの検証、標準モデルを超える物理事象を観測する事を目的として様々な実験が行なわれている。その中で、Bファクトリー実験はB中間子のCP対称性の破れの検証、小林・益川理論の証明を主な目的として行なわれている。

CP対称性の破れは中性K中間子において1964年にFitch, Croninらによるブルックヘブン国立研究所(BNL)の陽子加速器を使った実験で最初に発見された[1]。この現象を説明する為に、小林・益川が1972年に提唱した理論が小林・益川理論である[2]。小林・益川理論は当時3つしか発見されていなかったクォークが6つある事を予言しており(現在では全て発見されている)、B中間子系でCP対称性の破れの効果が大きくなる事が示された[3]。そのため、B中間子を大量に生成する電子・陽電子衝突型加速器Bファクトリーの建設が1990年代後半から推進された。この加速器が、高エネルギー加速器研究機構のKEKB[4]とスタンフォード線形加速器センターのPEP-II[5]であり、これらの加速器を用いた実験がBelle実験とBaBar実験[6]である。両者の実験は互いに競い合い、2001年にほぼ同時にCP対称性の破れが観測された[7]。なお、BaBar実験は2008年に実験を終了しており、Belle実験も2010年で終了する予定である。

現在、Belle実験の後継実験としてBelle II実験が計画されている。このBelle II実験はBelle実験より測定器の性能向上と共に更に統計精度を上げる事によって、標準モデルを超える新しい物理を観測する事を目的としている。新しい物理を観測する為には、LHC等のエネルギーフロンティアで実験を行なうか、現在Belle実験で測定している崩壊事象よりも更に低い崩壊確率によって起こる事象を観測するかの2つの方法がある。Belle II実験では加速器のエネルギーを上げる前者の方法ではなく、稀有な崩壊事象を余す事なく観測するという後者の方法での実験を計画しており、現在Belle測定器・KEK加速器のアップグレードを進めている。

このBelle測定器のアップグレード計画の1つとして、 K/π 粒子識別検出器のアップグレードに関する開発研究が進行している。 K/π 粒子識別はB中間子の崩壊過程を特定する為には非常に重要な役割を担っており、Belle II実験において高

第1章 序章

精度の測定を行なう際には高い K/π 粒子識別が求められる。そのため、Belle II 測定器における新しい K/π 粒子識別検出器として RICH(Ring Image Cherenkov) 検出器という検出器を採用し、その開発を行なっている。

本論文では、この RICH 検出器の開発について、その読み出し回路の開発を中心に報告する。以降、第1章に Belle 実験における物理的背景として小林・益川理論と B 中間子系での CP 対称性について述べた後、Belle II 実験で探求される標準モデルを超える物理のいくつかの例を示す。2章では、Belle 実験の概要、KEKB 加速器・Belle 測定器の構成について示した後、Belle 測定器での K/π 粒子識別の方法とその問題点を述べ、更に Belle II 実験へ向けた加速器・検出器アップグレード計画の概要を示す。第3章では RICH 検出器の原理と構造と其中で用いられる光検出器等の各構成要素について述べ、第4章においてその読み出し回路の開発と性能評価の結果について述べる。第5章では本年度に行なった電子ビームを用いたプロトタイプ RICH 検出器の性能評価実験の結果について述べる。第6章では測定結果のまとめを行い、今後の展望について述べる。

1.2 物理的背景

1.2.1 CKM 行列と Unitarity Triangle

CP 対称性の破れは中性 K 中間子の崩壊において最初に観測された。この CP 対称性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・益川理論によると、クォークには電荷+2/3のアップ(u), チャーム(c), トップ(t)の3世代のアップ型クォークと、電荷-1/3のダウン(d), ストレンジ(s), ボトム(b)の3世代のダウン型クォークの6種類が存在し、弱い相互作用を通じて世代を超えて遷移する。この世代間混合は一般的に以下の様に表される。

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

d', s', b' は弱い相互作用の固有状態であり、 u, s, b は質量固有状態である。この2つの固有状態を結びつけている行列 V_{CKM} を Cabibbo Kobayashi Maskawa 行列 (CKM 行列) と呼び、例えば V_{ub} は b クォークから u クォーク (または \bar{u} クォークから \bar{b} クォーク) への遷移振幅、複素共役 V_{ub}^* は逆過程の遷移振幅にかかる係数となり、CKM 行列の各成分が世代間遷移の遷移振幅の係数に対応している。

1.2. 物理的背景

ここで、この CKM 行列を 4 つのパラメータ (A, λ, ρ, η) を用いる Wolfenstein 表示で表すと、

$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + \mathcal{O}(\lambda^4) \quad (1.2)$$

となり、これまでの実験結果から、 $A=0.814 \pm 0.021$, $\lambda=0.226 \pm 0.001$, $\rho=0.143 \pm 0.027$, $\eta=0.350 \pm 0.017$ と求まっている。そして、最外非対角要素である V_{ub} と V_{td} にある複素位相が、小林・益川理論による CP 対称性の破れの源である。

また、CKM 行列はユニタリー行列であるという要請より各行列要素に対して、

$$\sum_i V_{ij}^* V_{ik} = \delta_{jk} \quad (1.3)$$

を満たす。この内、複素位相を含む V_{ub} と V_{td} に対して、

$$V_{ub}^* V_{ud} + V_{cb}^* V_{cd} + V_{tb}^* V_{td} = 0 \quad (1.4)$$

という関係が成り立つ。この 1.4 式を複素平面上で幾何学的に表すと、Unitarity Triangle と呼ばれる図 1.1 の様な三角形を描く事ができる。この Unitarity Triangle の内角は、CKM 行列の各要素を用いて

$$\phi_1 = \arg \left(\frac{V_{cd} V_{cb}^*}{V_{td} V_{tb}^*} \right), \quad \phi_2 = \arg \left(\frac{V_{ud} V_{ub}^*}{V_{td} V_{tb}^*} \right), \quad \phi_3 = \arg \left(\frac{V_{cd} V_{cb}^*}{V_{ud} V_{ub}^*} \right) \quad (1.5)$$

のように表され、この三角形がつぶれてなく、閉じていれば小林・益川理論が正しい事が証明できる。Belle 実験ではこの三角形の 3 辺及び 3 つの内角を各々別々に測定し、その結果から閉じた三角形を得られるかを検証する事で、理論の証明を行なった。

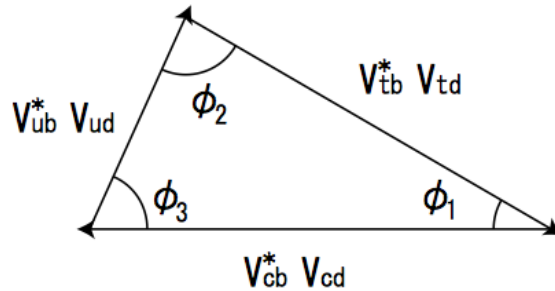


図 1.1: Unitarity Triangle。

第1章 序章

表 1.1: Unitarity Triangle のパラメータと観測事象。

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

IDCPV : In-Direct CP Violation

DCPV : Direct CP Violation

1.2.2 B 中間子における CP 対称性の破れの測定

Unitarity Triangle の3辺及び3つの内角の決定はB中間子の崩壊事象精密に測定する事で決定される。表 1.1 に各々のパラメータ決定に必要な観測事象をまとめる。

CP 対称性の破れには、直接的 CP 対称性の破れと $B^0 \bar{B}^0$ 混合によって生じる間接的 CP 対称性の破れが観測される。以下に、この2つの CP 対称性の破れについて記述する。

直接的 CP 対称性の破れ (DCPV : Direct CP Violation)

直接的 CP 対称性の破れは、粒子 A においてある事象が起こる確率を $\Gamma(A)$ 、この事象を CP 変換して得られる事象が起こる確率を $\Gamma(\bar{A})$ と表す時、

$$\Gamma(A) \neq \Gamma(\bar{A}) \quad (1.6)$$

となる事象を観測する事で確認される。

具体的な例として、 $B^\pm \rightarrow \pi^0 K^\pm$ を考える。この反応では図 1.2 のようなツリー及びペンギンダイアグラムと呼ばれる2つの崩壊モードを持つ。このツリーダイアグラムとペンギンダイアグラムの間の位相差によってB中間子と反B中間子の崩壊の崩壊振幅に差が生じる。以上のように直接的 CP 対称性の破れでは崩壊振幅そのものがB中間子と反B中間子で変化し、CP 非対称性が生じる。

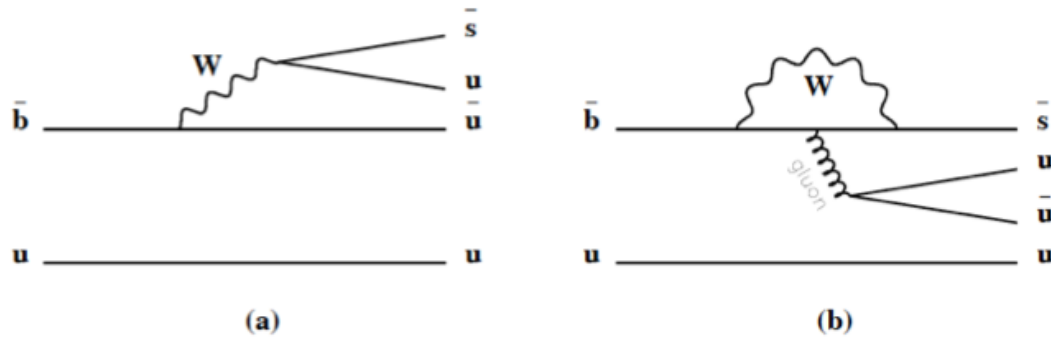


図 1.2: $B^\pm \rightarrow \pi^0 K^\pm$ 崩壊。(a)tree diagram、(b)penguin diagram。

間接的 CP 対称性の破れ (IDCPV : In-Direct CP Violation)

間接的 CP 対称性の破れは B^0 と \bar{B}^0 の状態の混合によって CP 対称性の破れが生じる。この場合では図 1.3 のように B^0 中間子が \bar{B}^0 中間子に変化し、逆に \bar{B}^0 中間子が B^0 中間子に変化する $B^0\bar{B}^0$ 混合過程が関わっている。この間接的 CP 対称性の破れでは直接的 CP 対称性の破れの時と異なり、崩壊振幅は粒子・反粒子では変化が無く、観測される CP 対称性の破れは時間発展として測定される。なお、粒子・反粒子の混合は $K^0 - \bar{K}^0$ 、 $D^0 - \bar{D}^0$ においても確認されており、現在観測されている K 中間子での CP 対称性の破れはこの粒子・反粒子混合によるものと考えられている。

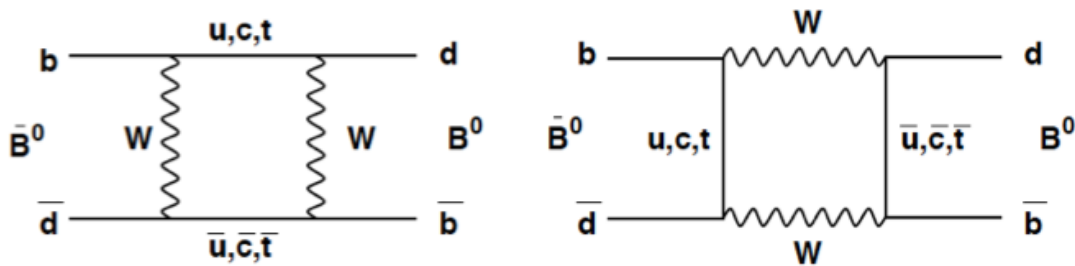


図 1.3: $B^0\bar{B}^0$ mixing。

1.2.3 Belle II 実験で探求される標準モデルを超える物理

小林・益川理論を含めた素粒子物理学の標準モデルは、この 30 年の間の様々な実験データと非常に良く一致している。しかし、この標準モデルを究極の理論と言うには不十分であり、標準モデルを超えた新しい物理が存在すると考えられて

第1章 序章

いる。Belle II 実験ではこの新しい物理を探求する事を目的としており、この節では Belle II 実験で観測される可能性がある標準モデルを超える物理の例を紹介する(詳細は参考文献 [8, 9, 10] を参照)。

$B \rightarrow \phi K_s$ 崩壊

標準モデルを超える理論として超対称性理論(SUSY)が有望視されている。SUSY で予言される新粒子はペンギンダイアグラムのようなループを持った崩壊に寄与すると考えられる。 $B \rightarrow \phi K_s$ 崩壊は標準モデルにおいては図 1.4-(a) で示したペンギン崩壊でのみおこる。そのため、標準モデルでは $B \rightarrow \phi K_s$ 崩壊は $B \rightarrow J/\psi K_s$ と同様に間接的 CP 対称性の破れを起こす。従って、標準モデルの枠内であれば $B \rightarrow \phi K_s$ と $B \rightarrow J/\psi K_s$ の2つの崩壊から求めた CP 非対称角 $\sin(2\phi_1)$ は等しくなるはずである。しかし、もし SUSY 粒子が寄与した場合は $B \rightarrow \phi K_s$ 崩壊において図 1.4-(b)~(f) で示したようなループ中に SUSY 粒子が関与する崩壊が起こり、CP 非対称度が標準モデルからずれる。対して、 $B \rightarrow J/\psi K_s$ 崩壊は、ツリー崩壊で起こる為 SUSY 粒子の様な新粒子の寄与が小さい。よって、Belle II 実験では $B \rightarrow \phi K_s$ 崩壊を精密測定をし、 $B \rightarrow J/\psi K_s$ 崩壊での CP 非対称度を比較する事により、新しい物理の探る事ができる。

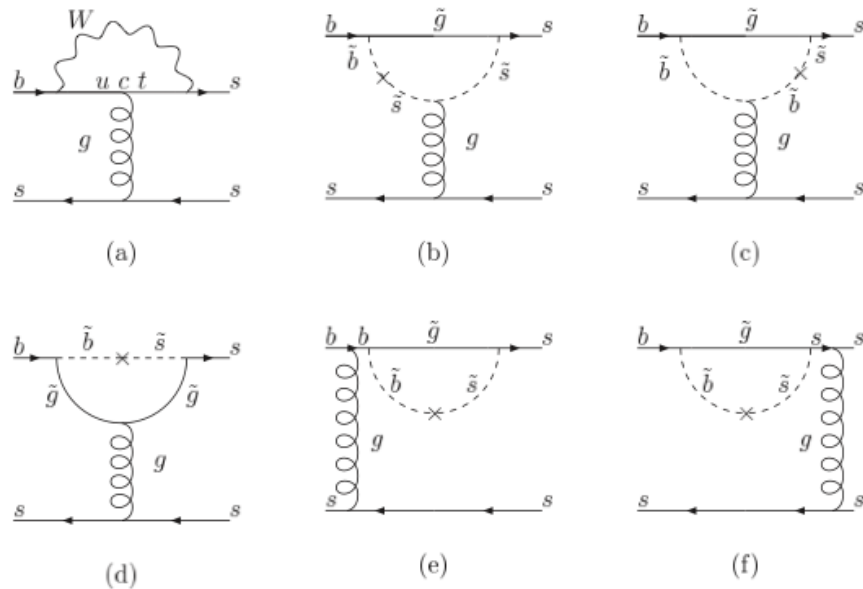


図 1.4: $B \rightarrow \phi K_s$ 崩壊。(a) 標準モデルでの崩壊。(b)-(f) SUSY 粒子が関与した際の崩壊。

なお、Belle 実験・Babar 実験においてもこれらの崩壊は測定されており、そこ

1.2. 物理的背景

から求められた CP 非対称角 $\sin(2\phi_1)$ は図 1.5 のようになっている。この結果では両者の崩壊による値が多少ずれているようにも見えるが誤差の範囲内に収まる程度であるので、更に高い精度で実験を行なう事が必要である。

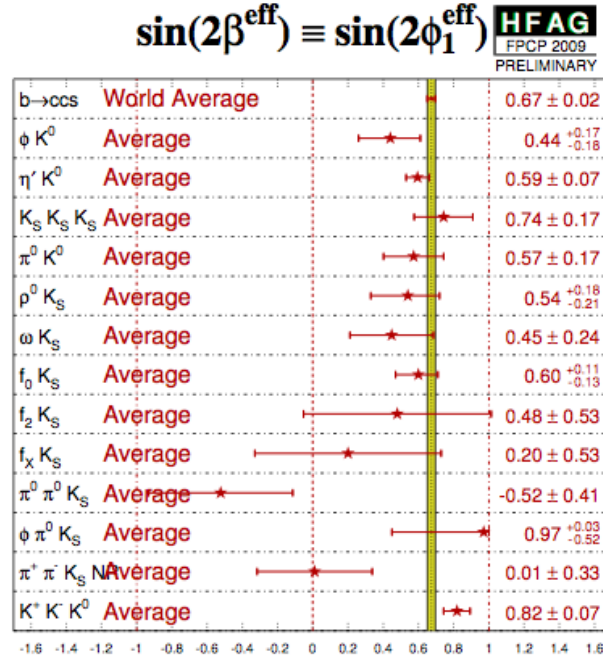


図 1.5: 様々な崩壊での $\sin(2\phi_1)$ 。

$B \rightarrow K^* l^+ l^-$ 崩壊

$B \rightarrow K^* l^+ l^-$ 崩壊は図 1.6 のようにペンギンダイアグラムと box ダイアグラムで起こり、新しい物理に対してより多くの情報を得られると考えられている。この崩壊はレプトンの観測により loop 内の過程を予測する事ができる。ここでは、その 1 つとして Forward-backward asymmetry [11, 12, 13] について簡単に説明する。Forward-backward asymmetry はレプトンが前方方向に崩壊する場合と後方に崩壊する場合の崩壊確率の非対称性であり、標準モデルでは Z^0 を経た過程と γ を経た過程の干渉として起こる。このため、新しい物理が寄与した場合はこの非対称性が標準モデルからずれる。

図 1.7 はこの Forward-backward asymmetry の Belle 実験での結果である [14]。この結果は標準モデルの予想 (赤) から実験結果がずれている。しかし、この結果も新しい物理の証拠となる程のずれとは言えず、Belle II 実験での精度が高い測定が必要である。

第1章 序章

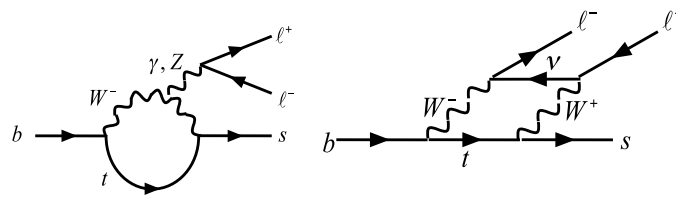


図 1.6: $b \rightarrow sl^+l^-$ 崩壊。(左)ペンギンダイアグラム、(右)box ダイアグラム。

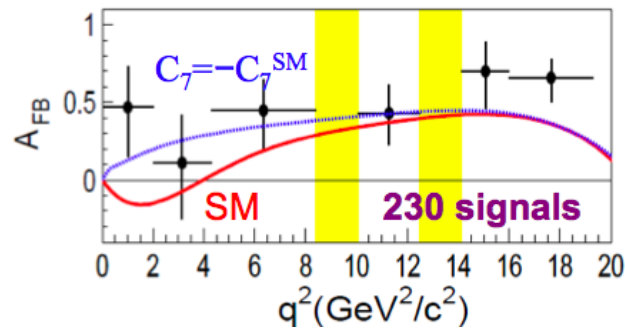


図 1.7: Belle 実験での Forward-backward asymmetry の観測結果 (赤線は標準モデルでの予想)。

$B \rightarrow \rho\gamma$ 崩壊

$B \rightarrow \rho\gamma$ 崩壊は $b \rightarrow d\gamma$ 崩壊で起こる (図 1.8)。 $B^0 \rightarrow \rho^0\gamma$ 崩壊は標準モデルでは時間依存の CP 非対称が小さいと考えられるが、新しい物理の効果の寄与によって大きな CP 非対称が観測されることが考えられる。したがって、この崩壊で時間依存の CP 非対称を測定する事によって新しい物理の探求が行なえる。しかし、この崩壊は $B \rightarrow K^*\gamma$ がバックグラウンドとなる為、Belle II 実験では高い Belle 実験以上の高い K/π 粒子識別が必要である。

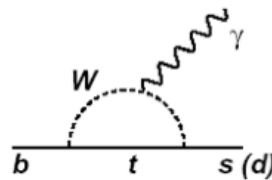


図 1.8: $b \rightarrow s(d)\gamma$ 崩壊。

表 1.2 に Belle II 実験で重要となる物理の Belle 実験 ($0.5ab^{-1}$)、 $5ab^{-1}$ 、 $50ab^{-1}$ での測定精度を示す。

1.2. 物理的背景

表 1.2: Belle II 実験で鍵となる物理の Belle($0.5ab^{-1}$)、 $5ab^{-1}$ 、 $50ab^{-1}$ での測定精度。

	Belle'06 ($0.5ab^{-1}$)	$5ab^{-1}$	$50ab^{-1}$
$\Delta S(\phi K^0)$	0.22	0.073	0.029
$\Delta S(\eta' K^0)$	0.11	0.038	0.020
$\Delta S(K_s K_s K_s)$	0.33	0.105	0.037
$\Delta S(K_s \pi^0 \gamma)$	0.32	0.10	0.03
$\text{Br}(X_s \gamma)$	13%		
$A_{\text{CP}}(X_s \gamma)$	0.058	0.01	0.05
$C_9[A_{\text{FB}}(K^* l)]$	—	11%	4%
$C_{10}[A_{\text{FB}}(K^* l)]$	—	13%	4%
$\text{Br}(B^+ \rightarrow K^+ \nu \nu)$	$< 9\text{Br}(\text{SM})$	$33ab^{-1}$ for 5σ discovery	
$\text{Br}(B^+ \rightarrow \tau \nu)$	3.5σ	10%	3%
$\text{Br}(B^+ \rightarrow \mu \nu)$	$< 2.4\text{Br}(\text{SM})$	$4.3ab^{-1}$ for 5σ discovery	
$\text{Br}(B^+ \rightarrow D \tau \nu)$	—	7.9%	2.5%
$\text{Br}(\tau \rightarrow \mu \gamma)$	< 45	< 30	< 8
$\text{Br}(\tau \rightarrow \mu \eta)$	< 65	< 20	< 4
$\text{Br}(\tau \rightarrow 3\mu)$	< 209	< 10	< 1
$\sin 2\phi_1$	0.026	0.016	0.012
$\phi_2(\rho\pi)$	$68^\circ - 95^\circ$	3°	1°
$\phi_3(\text{Dalitz})$	20°	7°	2.5°
$V_{ub}(\text{incl.})$	7.3%	6.6%	6.1%

第2章 Belle実験

2.1 概要

Belle 実験は B 中間子の崩壊における CP 対称性の破れを詳細に測定し、標準モデルに導入された小林・益川理論の検証を行なう事を主目的として 1999 年から茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構 (図 2.1) で開始された実験である。この B 中間子の崩壊を精密に測定する為に、大量の B 中間子を電子・陽電子衝突型加速器 KEKB によって生成し、衝突点に設置された Belle 測定器で B 中間子の崩壊過程を観測している。今までに、2001 年に中性 B 中間子 (B^0 または \bar{B}^0) が J/ψ と K^0 への崩壊過程で大きく CP 対称性が破れる事を発見し、小林・益川理論を証明し、その他にも $X(3872)$ の発見 [15]、D 中間子と反 D 中間子の混合の発見 [16] 等、様々な成果を挙げている。また、実験は 2010 年で終了し次期後継実験 Belle II へ向けて加速器・検出器のアップグレードが進行している。



図 2.1: 高エネルギー加速器研究機構と KEKB 加速器。

2.2 KEKB 加速器

Belle 実験で使用される電子・陽電子衝突型加速器 KEKB は B 中間子を大量に生成することから B ファクトリーと呼ばれている。KEKB では電子を 8.0 GeV/c、陽電子を 3.5 GeV/c まで加速する事によって、重心系でのエネルギーが 10.58 GeV/c となる。電子と陽電子の衝突により、 b と \bar{b} の共鳴結合粒子である $\Upsilon(4s)$ が生成され、 $\Upsilon(4s)$ から $B\bar{B}$ 中間子対が作り出される。しかし、静止した $B\bar{B}$ 中間子対はわずか 1ps で崩壊してしまう為、このまま $B\bar{B}$ 中間子対の崩壊時間差を測定する事は技術的に不可能である。そのため、電子・陽電子を非対称なエネルギーで衝突させる事により、生成される $\Upsilon(4s)$ に実験室系で 4.5 GeV/c 程度の運動量を与え、 $\Upsilon(4s)$ の崩壊によって生成される $B\bar{B}$ 中間子に 4.5 GeV/c 程度の運動量を持たせている。こうする事によって相対論的効果によって B 中間子の寿命は見かけ上延長され、また崩壊までの飛行距離を測定する事で $B\bar{B}$ 中間子対の崩壊時間差の測定を可能としている。以上の事より B ファクトリーは非対称衝突型の加速器として建設され、電子と陽電子は別々のリングで加速される。

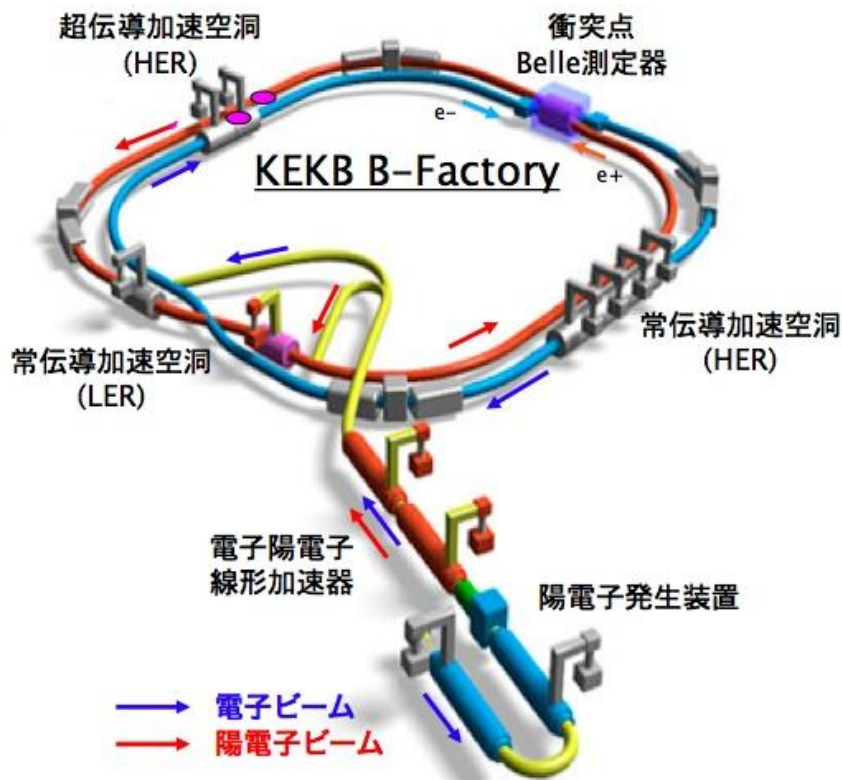


図 2.2: KEKB 加速器。

KEKB 加速器は図 2.2 のような構造をしており、Belle 測定器がある筑波実験棟

第2章 Belle 実験

において電子と陽電子が衝突するように作られている。衝突点では各ビームを角度 22 mrad で衝突させている。この設計は、1つのリングで蓄積できる電子(陽電子)数の上限を上げ、また衝突後に両方のビームを分離するための磁石を必要としない為、衝突点付近の簡素化に役立っている。各リングには約 5000 バンチ (1 バンチ $\sim 10^{10}$ electron(positron)) の電子・陽電子が約 60 cm 間隔に並んでおり、衝突点付近でのバンチサイズは $L \times H \times W = 4 \times 0.008 \times 0.3 \text{ mm}^3$ になる。また、ルミノシティは稼働し始めた 1999 年から向上していき、現在ピークルミノシティとして $2.11 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を記録し、世界最高の性能を誇っており (図 2.3)、年間 10^8 程度の B 中間子対を生成している。

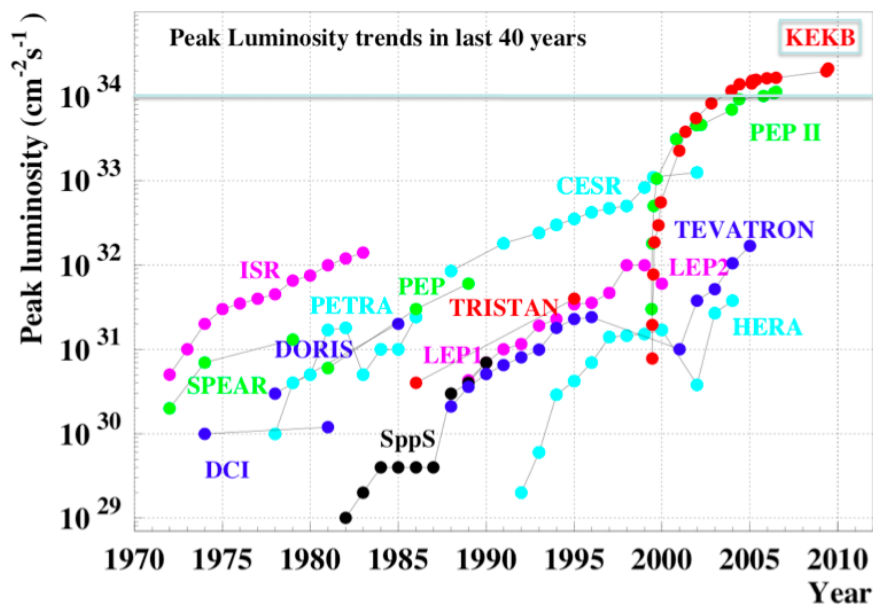


図 2.3: 世界の衝突型加速器のルミノシティ。

2.3 Belle 測定器

B 中間子の CP 対称性の破れの測定においては、B 中間子の特定の崩壊過程を他の崩壊過程から区別する事が必要となる。1.2.1 節で述べたように Unitarity Triangle (図 1.1) の各パラメータ決定に必要な観測事象は表 1.1 で示したが、Belle 実験ではこれらの崩壊過程で表れる粒子を検出する事により崩壊過程を特定する。ただし、 π^0 、 K_s 等の崩壊寿命が短い粒子は、検出器で検出される前に $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ 、 $K_s \rightarrow \pi^+\pi^-$ 等を経て崩壊する。そのため、検出器で検出される粒子は表 2.1 で示す粒子のみとなる。

2.3. Belle 測定器

表 2.1: Belle 測定器の観測対象粒子。

荷電粒子	$e^\pm, \mu^\pm, \pi^\pm, K^\pm, p$
中性粒子	γ, K_L, n

これらの粒子の運動量やエネルギーを精度良く測定する為、Belle 測定器 [17] は役割に応じて 6 種類の副検出器群から構成される複合検出器である。検出器はビームに平行してビーム衝突点を囲むように円筒形の形状をしており、円筒側面部分を barrel 部、陽電子入射側の円筒の底部分を endcap 部と呼んでいる。また、Belle 測定器を構成する副検出器はビーム衝突点に近い方から SVD、CDC、ACC、TOF、ECL、KLM の順に層を成すように配置されており、ソレノイド電磁石によって作られる 1.5T の磁場中で動作している。なお、以降で出てくる θ は電子・陽電子の衝突点を原点として電子ビーム方向からの極角として定義する。

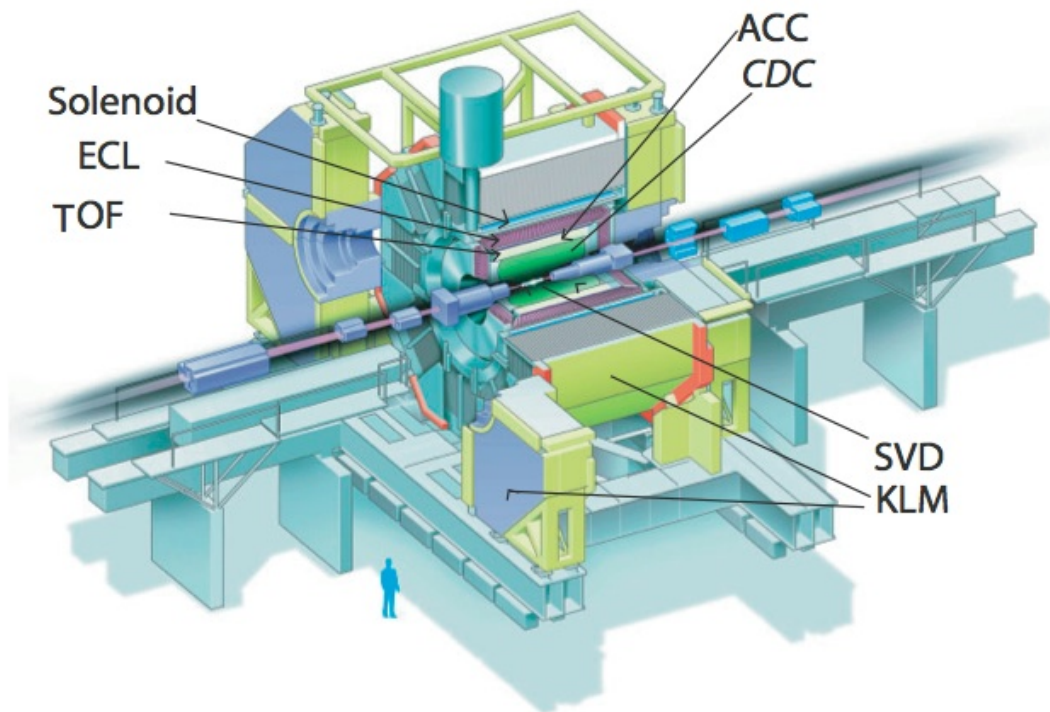


図 2.4: Belle 測定器

以降、この節では各副検出器群について簡単に説明する。なお、ACC に関しては次節 2.4 節で説明する為、この節では ACC 以外の検出器について記述する。

第2章 Belle 実験

2.3.1 Silicon Vertex Detector(SVD)

SVD は Belle 測定器の中で最も衝突点近くに設置され、粒子の崩壊位置を高精度に測定する為の検出器である。この検出器はシリコンマイクロストリップと呼ばれる半導体検出器を4層にわたって円筒形状に配置した構造になっており、各層での測定器上の粒子通過点を測定する事によってB中間子の崩壊点を導出する。現在、約 $80\mu\text{m}$ という高い精度で、 $17 < \theta < 150^\circ$ の範囲で荷電粒子の飛跡の測定を可能としている。

2.3.2 Central Drift Chamber(CDC)

CDC は粒子の飛跡を観測する為のドリフトチェンバーで、SVDの外側に配置されている。センスワイヤには直径 $30\mu\text{m}$ の金メッキしたタンゲステンワイヤをフィールドワイヤに直径 $120\mu\text{m}$ のアルミニウムワイヤを用い、 $\text{He-C}_2\text{H}_6(50:50)$ を充填ガスとして使用している。Belle 測定器にはソレノイド磁石によって 1.5T の磁場がかかっている為、CDCで荷電粒子の飛跡を精密に測定し、その飛跡の曲率を導出する事によって、荷電粒子の運動量を決定する事ができる。また、ガス増幅によってできた信号の大きさから通過した荷電粒子のエネルギー損失も測定できる。このエネルギー損失の測定と運動量の測定を用いる事によって低運動量領域の K/π 識別も担っている。

$$\begin{aligned} \text{運動量分解能} &: \sigma_{p_t}/p_t = 0.3\% \sqrt{1 + p_t^2} \\ \text{エネルギー損失分解能} &: \sigma_{dE/dx} = 6\% \end{aligned}$$

2.3.3 Time-of-Flight Counter(TOF)

TOF は barrel 部の ACC の外側に位置する検出器であり、荷電粒子がビーム衝突点から TOF までの約 1.2m の距離を通過するまでの飛行時間を 100ps の時間分解能で測定する事によって粒子の速度を測定する。この速度の情報を用いる事によって低運動量領域 ($p < 1.2\text{GeV}/c$) での K/π 粒子識別を担っている。TOF は plastic scintillator を用いた scintillation counter であり、128本の TOF counter と 64本のトリガー信号生成用の scintillation counter(TSC) で構成されている。また、測定可能領域は $34 < \theta < 120^\circ$ となっている。

2.3.4 Electromagnetic Calorimeter(ECL)

ECLは γ 線や電子のエネルギー測定する検出器である。ECLはCsI(Tl) crystalを使用しており、入射してきた γ や電子は電磁シャワーを起こし、エネルギーを全て失う。そのエネルギーの一部がCsI(Tl)からのシンチレーション光に変換される為、発生したシンチレーション光からエネルギーを導出する事ができる。また、電磁シャワーの形状、CDCでの飛跡の有無等の情報を用いる事によって、電子と γ を同定する事もできる。

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

2.3.5 K_L/μ Detector(KLM)

KLMは高抵抗ガラス平行版(RPC)と鉄板とのサンドイッチ構造をしており、barrel部ではRPCと鉄板の15層+14層、endcap部では14層+14層で構成されている。この検出器はBelle測定器の最も外側に位置し、貫通力の強い μ 粒子のみが全ての鉄板を通り抜けられ、その他の粒子は鉄板で止まってしまう。このため、PRCに飛跡を残した粒子を μ 粒子と特定する事ができる。また、 K_L は中性であるため電磁相互作用は起こさないが、hadronic interactionをECLやKLMで起こす為、エネルギーは精度良く測定できないが、飛んだ方向が特定できる。この様にしてKLMは K_L と μ 粒子の識別を行なっている。

2.4 Aerogel Cherenkov Counter(ACC)

ACC(閾値型 Aerogel Cherenkov Counter)は輻射体(silica aerogel)を荷電粒子が通過した際に放射するチェレンコフ光を利用した閾値型のチェレンコフカウンターで、Belle測定器において高運動量領域($1.2 < p[\text{GeV}/c] < 3.5$)での K/π 粒子識別を行なっている。(荷電粒子の速度)/光速を $\beta(=v/c)$ 、aerogelの屈折率を n とした時、チェレンコフ光の発生条件は $\beta > 1/n$ となる為、適切なaerogelの屈折率の設定によって K 中間子に対してはチェレンコフ光を発生せず、 π 中間子のみチェレンコフ光を発生する運動量領域を作る事ができる。

ACCはCDCの外側に位置しており、barrel部とendcap部の両方に設置されている(図2.5)。Barrel部は衝突点からの角度に応じてaerogelの屈折率を1.010~1.028の範囲で選択しているが、endcap部では一様に屈折率1.03のaerogelを用いている。この2.4節ではACC等で行なっている K/π 粒子識別のBelle実験(Bファクトリー実験)での重要性を最初に示し、ACCの原理・問題点について記述する。

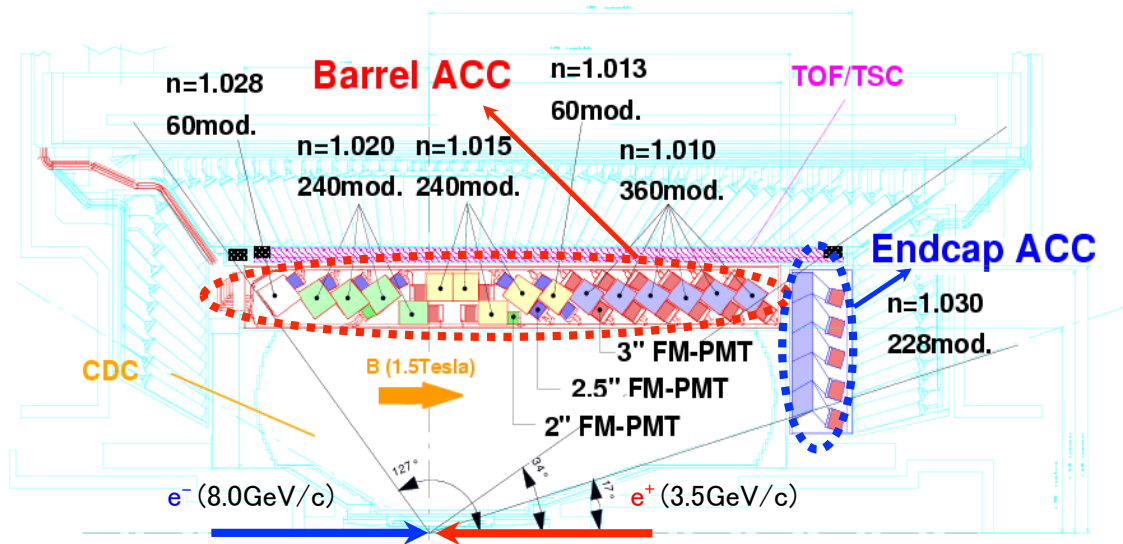


図 2.5: Belle 測定器内での ACC の構成。

2.4.1 K/ π 粒子識別

高エネルギー物理学における粒子生成崩壊反応の解析を行なう上では、検出可能な終状態の粒子 (Belle 実験におけるこれらの粒子は表 2.1 で示した) からどのような生成崩壊過程であったかを特定し、解析に必要なデータのみを取り出す事が必要となる。このため、明確に粒子を同定する事が可能な粒子識別装置が非常に重要となり、特に高い精度での K/ π 粒子識別が Belle 実験等の B ファクトリー実験では必要とされている。

以下に、親 B 中間子の同定の為の flavor tagging、及び Unitarity triangle の内角を求める際の K/ π 粒子識別の重要性について記述する。

Flavor tagging

B 中間子における崩壊事象において Unitarity triangle の内角 ϕ_1 を測定する為には B^0, \bar{B}^0 から $J/\Psi K_s$ への崩壊モードを観測する必要がある。しかし、この崩壊モードでの終状態の粒子は B^0, \bar{B}^0 のどちらからの崩壊であっても同じである為、親粒子が B^0, \bar{B}^0 のどちらであるかを終状態の粒子から決定することができず、他の方法で親粒子を特定する必要がある。このように B 中間子系の崩壊過程において親粒子が B^0, \bar{B}^0 のどちらであるか決定する事を flavor tagging という。以下では $\bar{B}^0 \rightarrow J/\Psi K_s$ の崩壊モード (図 2.6) を例として flavor tagging について解説する。

2.4. Aerogel Cherenkov Counter(ACC)

Flavor tagging では B 中間子から $J/\Psi K_s$ の崩壊事象に対して、もう一方の B 中間子 ($\bar{B}^0 \rightarrow J/\Psi K_s$ の崩壊事象では B^0) の崩壊事象に注目する。一般的には B 中間子はカスケード崩壊 ($b \rightarrow c \rightarrow s$) により崩壊するため、 $B \rightarrow D \rightarrow K$ という崩壊事象が観測される。この崩壊では B^0 中間子は $B^0 \rightarrow D^- \rightarrow K^+$ となり、 \bar{B}^0 中間子は $\bar{B}^0 \rightarrow D^+ \rightarrow K^-$ という崩壊モードが与えられる。このため、崩壊事象中に K^+ が見つければ、その崩壊事象の親粒子は B^0 となり、注目している $J/\Psi K_s$ への崩壊の親粒子は \bar{B}^0 と決定する事ができる。そのため、Belle 実験ではカスケード崩壊に伴う K^\pm を大量の π^\pm から精度良く識別する必要があり、 K/π 粒子識別が重要となっている。

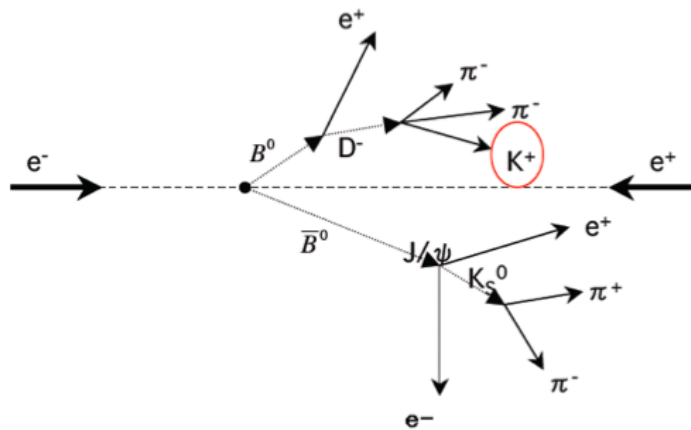


図 2.6: $\bar{B}^0 \rightarrow J/\Psi K_s$ の崩壊事象例。

Unitarity triangle の内角 ϕ_2 、 ϕ_3 の測定

表 1.1 で示したが、Unitarity triangle の内角 ϕ_2 の測定には $B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ の崩壊モードに注目するが、 B^0 中間子は $B^0 \rightarrow K^+ \pi^-$ にも同程度の確率で崩壊する。

また、 ϕ_3 の測定では $B \rightarrow DK$ の崩壊モードに注目するが、 $B \rightarrow D\pi$ の崩壊モードを区別しなければならない。

表 2.2 に Unitarity triangle の内角の決定に重要となる K/π 粒子識別な崩壊モードを、その崩壊モードを伴う運動量領域、排除すべき崩壊モードと共に示す。

これらの事からも必要とする崩壊モードを大量のデータから精度良く取り出す為には K/π 粒子識別が非常に重要である事が分かる。

第2章 Belle 実験

表 2.2: K/ π 粒子識別が必要な崩壊モードとその運動量領域。

物理事象	崩壊モード	運動量領域 [GeV/c]	Rejection mode
Flavor tagging	$b \rightarrow c \rightarrow s$	$0.2 < p < 1.5$	-
ϕ_1	$B \rightarrow J/\Psi K_s$	-	-
ϕ_2	$B \rightarrow \pi\pi$	$1.8 < p < 3.8$	$B \rightarrow K\pi$
ϕ_3	$B \rightarrow DK$	$1.5 < p < 3.3$	$B \rightarrow D\pi$

2.4.2 ACC の原理

ACC は輻射体に silica aerogel を用いた閾値型チェレンコフカウンターである。チェレンコフ光は荷電粒子の速度が物質中の光速より大きい時に発生する。現象的にみると、荷電粒子が誘電体の中を通り過ぎると、粒子の電場により誘電体は分極をおこす。粒子が通りすぎた後にこの分極がもとに戻る時、電磁波を放射する。この時、粒子の速度 v が物質中の光の速度 c/n (n :物質の屈折率) より大きい場合は、誘電体中の数分子の位相が同じになり、放射した電磁波はコヒーレント光となって放射される。しかし粒子の速度が光の速度 c/n より小さい場合、その電磁波は位相が合う事無く打ち消し合う。直感的には、物質中で光の速度 c/n より速く走る荷電粒子が、そのまわりに持っている仮想光子を振り落として行く現象と考える事ができる。チェレンコフ放射は図 2.7 のように放射され、粒子の進行方向に角度 θ_c の方向に放射される。この放射角 θ_c は屈折率 n 、粒子の速度 $\beta (= v/c)$ を用いて

$$\cos \theta_c = \frac{1}{n\beta} \quad (2.1)$$

の式を満たす。なお、 $\cos \theta_c < 1$ より、式 2.1 は

$$\beta > \frac{1}{n} \quad (2.2)$$

と変形でき、この式は荷電粒子の速度が物質中の光速よりも大きいというチェレンコフ光の発生条件を表している。

また、波長 λ を持つチェレンコフ光の光子の数 N は、荷電粒子の電荷を ze 、荷電粒子が通過する輻射体の長さを x を用いて、

$$\frac{d^2 N}{dx d\lambda} = \frac{2\pi\alpha z^2}{\lambda^2} \sin^2 \theta_c \quad (2.3)$$

となる。ここで $\alpha = e^2/(4\pi\epsilon_0)\hbar c \approx 1/137$ は微細構造定数である。

2.4. Aerogel Cherenkov Counter(ACC)

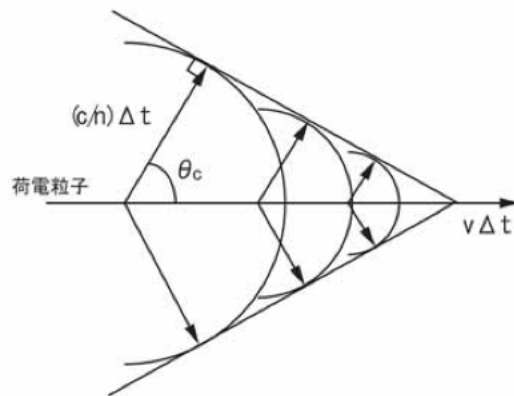


図 2.7: Cherenkov 放射

ここで、質量 m の粒子が速度 v で運動している時粒子の運動量 p は、

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad (2.4)$$

と表され、この式 2.4 と式 2.2 より、チェレンコフ光の発生条件は、

$$p > \frac{mc}{\sqrt{n^2-1}} \quad (2.5)$$

と表す事ができる。この式 2.5 より、輻射体の屈折率が決まっている時、粒子の質量によって、チェレンコフ光の発生する運動量領域が異なる事が分かる。ACC はこの違いを利用して、2種類の粒子 (K と π) が輻射体を通過する際に質量の小さい π のみがチェレンコフ光放射を起こすように輻射体の屈折率を調節し、チェレンコフ光の有無で粒子識別を行なっている。

2.4.3 Silica aerogel

Silica aerogel はゲル状の物質を超臨界乾燥する事で作られる高多孔質の個体で、その体積の 90%以上を空気が占める。主成分は二酸化ケイ素 (SiO_2) であり、無色透明である。Silica aerogel は、その構造中の主成分である SiO_2 が作り出す特異構造 (図 2.8) を持っており、それによって単純個体では得る事が困難な低屈折率、低密度を実現している。Silica aerogel 中では SiO_2 が、1~2nm の 1次粒子を形成し、この 1次粒子がさらに集まり、最大で 50nm となる 2次粒子が形成されている。1、2次粒子中の SiO_2 の密度はガラスと同程度の 2.4~2.6 g/cm^3 程度である。2次粒子は互いに鎖状に結合し合い、3次元ネットワークを形成し固体構造中の 90%以上

第2章 Belle 実験

が空孔となる事によって、固体であるにも関わらず低密度・低屈折率を可能としている。

表 2.3 に silica aerogel 及びその他の物質の屈折率を示す。

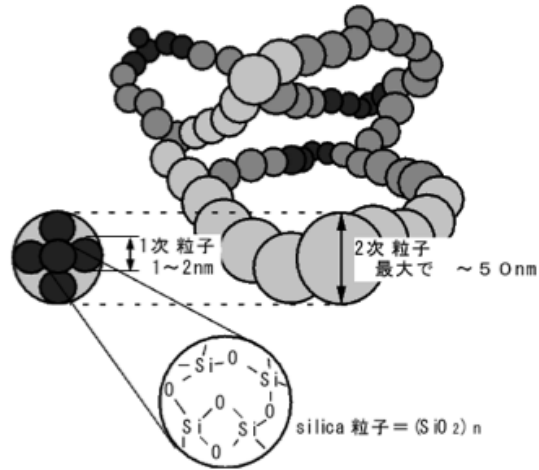


図 2.8: Silica aerogel の構造。

表 2.3: Silica aerogel 及びその他の物質の屈折。

	物質	屈折率
固体	ガラス	1.47
	ポリエチレン	1.58
	silica aerogel	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

Silica aerogel は、その特異構造によってガス等の気体物質より安定な固体であり、また他の固体物質では実現困難な低屈折率を持ち、光に対して良い透明度を示す。さらに、屈折率を自由に調整する事も可能である。これらの利点より、silica aerogel は Belle 測定器のチェレンコフカウンターの輻射体として適しており、ACC の輻射体として用いられている。同様の理由から Belle II 測定器でも Aerogel RICH 検出器の輻射体として使用される。

2.4.4 ACCの粒子識別能力と問題点

ACCでは π 中間子のみでチェレンコフ光を発生するように輻射体の屈折率を調整し、K/ π 粒子識別を行なっている。図2.9に輻射体の屈折率に対するK中間子、 π 中間子のチェレンコフ光発生閾値運動量を示す。図2.9のK中間子の閾値運動量曲線と π 中間子の閾値運動量曲線で囲まれた領域においてK/ π 粒子識別が可能となっている。

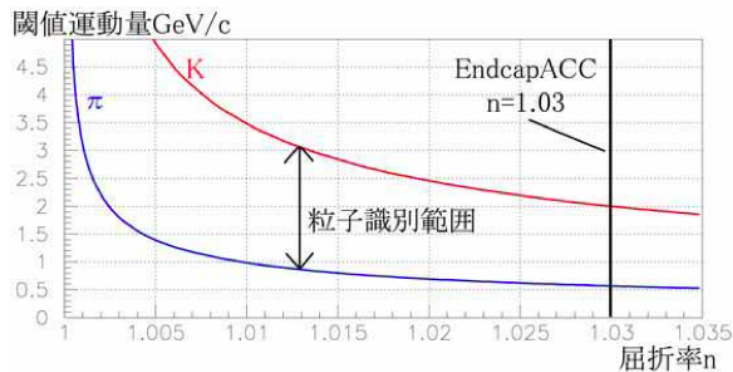


図 2.9: ACC の K/ π 識別能力 (π と K の屈折率に対する閾値運動量)。

図 2.5 で示したように、ACC は barrel 部と endcap 部の 2 カ所に搭載されており、barrel 部は衝突点からの角度に応じて、aerogel の屈折率を 1.010～1.028 の範囲で選択しており、endcap 部では一様に屈折率 1.03 の aerogel を用いている。このため、ACC の K/ π 粒子識別可能な運動量領域は、

$$\begin{aligned} \text{barrel 部} &: 0.6 < p < 3.5 [\text{GeV}/c] \\ \text{endcap 部} &: 0.5 < p < 2.0 [\text{GeV}/c] \end{aligned}$$

となっている。この様に endcap 部では barrel 部と比較して低い運動量領域でしか K/ π 粒子識別ができない。これは、endcap 部の空間的制約より、本来低運動量領域での K/ π 粒子識別を行なうはずの TOF が設置できなかった為であり、endcap 部では flavor tagging のみに重点を置いた設定になっている。しかし、endcap 部には低運動量のものから 2 体崩壊で生成された 4GeV/c 程度の高運動量のものも飛来しており、このような高運動量の粒子の粒子識別は不可能となっている。また、ACC のその他の問題点として knock-on 電子の問題がある。ACC は π 中間子のみがチェレンコフ光を発生する領域に設定されているが、K 中間子が aerogel 中の電子をたたき出し、その電子 (knock-on 電子) がチェレンコフ光を発生させる事がある。このような信号を π 中間子の信号と区別する事は閾値型のチェレンコフカウンターでは不可能である。

第2章 Belle 実験

Belle 実験のアップグレード後に開始される予定の Belle II 実験では、現在よりも更に稀な崩壊事象を観測する事を目的としており、その際には高い精度での K/ π 粒子識別が求められる。そこで ACC グループでは、endcap 部での高運動量領域での K/ π 粒子識別を可能とする新しい検出器を Belle II 実験に向けて開発している。この新型検出器が Aerogel RICH 検出器である。Aerogel RICH 検出器については次章に記述する。

2.5 Belle II 実験へのアップグレード

Belle 実験は 2010 年に終了を予定しており、後継の実験として Belle II 実験が計画されている。Belle II 実験では現在の素粒子物理学の標準モデルを超えた新しい物理を観測する事を目的としており、その為には現在の Belle で測定する事ができなかった非常に希少な崩壊も観測する事が求められる。したがって、現在よりも大量の B 中間子対を生成する加速器と、それらの崩壊事象を余す事無く観測する事ができる高性能な検出器が必要となり、加速器と検出器のアップグレードが進められている。

この節では現在アップグレードが進行している SuperKEKB 加速器、Belle II 測定器について簡単に述べる (詳細は参考文献 [18, 19] を参照)。

2.5.1 SuperKEKB

Belle 実験よりも更に大量の B 中間子対を生成する為に、KEKB 加速器の SuperKEKB 加速器へのアップグレード計画が現在進行している。このために、SuperKEKB は KEBB の約 40 倍のルミノシティ (ピークルミノシティが $8.0 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-2}$) を目指した設計となっている。加速器のルミノシティ L は、

$$L = \frac{\gamma_{e\pm}}{2er_e} \left(1 + \frac{\sigma_y^*}{\sigma_x^*} \right) \left(\frac{I_{e\pm} \xi_{y,e\pm}}{\beta_y^*} \right) \left(\frac{R_L}{R_{\xi_y}} \right) \quad (2.6)$$

と表される。ここで、 γ_{\pm} は電子・陽電子の Lorentz factor、 r_e は古典電子半径、 σ_x^* 、 σ_y^* は衝突点での水平・鉛直方向のビームサイズ、 I はビーム蓄積電流、 β_y^* は衝突点での β 関数、 R_L 、 R_{ξ_y} は L 、 ξ_y に対する補正係数、 ξ_y はビーム・ビームパラメータ (衝突点でビームが互いに及ぼし合う力の大きさ) を表している。SuperKEKB ではピークルミノシティ $8.0 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-2}$ を達成する為に、KEKB よりも蓄積電流を約 2 倍に増やし、衝突点でのビームサイズを小さくする事によって β 関数を約 20 倍、 ξ_y を KEBB と同一にする事が計画されている。表 2.4 に現在計画されている SuperKEKB の主要なパラメータを KEBB での値と共に示す。

2.5. Belle II 実験へのアップグレード

表 2.4: KEKB(達成値) と SuperKEKB(目標値) でのビームパラメータ。

	KEKB	SuperKEKB
Energy[GeV](LER/HER)	3.5/8.0	4.0/7.0
β_y^* [mm]	5.9/5.9	0.27/0.42
ϵ_x [nm]	18/24	3.2/1.7
σ_y [μm]	0.94	0.059
ξ_y	0.129/0.090	0.09/0.09
σ_z [mm]	~ 6	6/5
I [A]	1.64/1.19	3.6/2.6
バンチ数	1584	2500
Luminosity[$10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-2}$]	2.11	80

ϵ_x :水平方向のエミッタンス

2.5.2 Belle II 測定器

Belle II 実験では加速器の Luminosity の向上等により background が増加すると考えられ、この増加した background の中でも現在の Belle 測定器よりも高い性能を有する事が測定器に求められる。また、生成される B 中間子対も増加する為、読み出しの高速化も必要である。

以下に、現在計画されている Belle II 測定器を構成する各検出器の Belle 測定器からの改良点について記述する。

SVD

SVD の性能向上の為にはビームパイプになるべく近い位置に配置する事が考えられ、Belle II 実験でも現在よりもビームパイプ近くに配置する (1.5cm \rightarrow 1.3cm) 事が考えられている。しかし、ビームパイプ近傍は background が非常に多い為、その領域では background の影響が少ない pixel 型の検出器が必要となる。また、物質量を少なくする為に薄い検出器である事も必要である。この検出器の候補としては DEPFET Pixel sensor (DEpleted P-channel FET) が考えられている。Belle II 測定器では Belle 測定器では 4 層であった SVD を 6 層に増加し、内側 2 層を DEPFET、外側 4 層を現在の Belle 測定器で使用している DSSD (double sided Si detector) を使用する事が考えられている。また、現在の CDC のビームパイプに近い部分は Belle II 実験での高 background 下では高い性能での使用が困難だと思われる事より、その部分の tracking は SVD が担う事になる。この為、SVD の外径は Belle 測

第2章 Belle 実験

定器での 8cm から 14cm に増加する。これらの変更によって tracking と崩壊点測定
の精度が Belle 実験より向上すると考えられる。

CDC

Belle 測定器において CDC は Belle 実験の開始から約 10 年間、高い性能のまま荷
電粒子の運動量とエネルギー損失を導出してきた。Belle II 実験においても CDC は
主要な飛跡検出器として現在の性能を維持しての使用が要求されている。この為、
新しい CDC は想定される現在の 20 倍の background での動作を考慮して設計され
ている。主な改善点としては、検出器の外径が大きくなり、有効面積が増えた点と
セルサイズが小さくなった点である。有効面積の増加は CDC の外側に位置する検
出器 (Barrel PID) が薄くなる事により CDC の占有可能な領域が増加した為であ
り、これにより運動量とエネルギー損失の分解能が向上する。なお、CDC の内径は
非常に高い background を避ける為 Belle 実験よりも大きくなっているが、この領
域は SVD によってカバーされる。また、セルサイズの縮小については Background
の影響を小さくする為である。さらに、読み出し回路についても時定数の短縮等
によって dead time の短縮を行なう事が考えられている。

表 2.5 に現在計画されている CDC の主要なパラメータを Belle 測定器のものと
共に示す。

表 2.5: 計画されている Belle II 測定器における CDC の主要なパラメータ。

	Belle	Belle II
Radius of inner boundary[mm]	77	160
Radius of outer boundary[mm]	880	1096
Number of layers	50	58
Number of total sense wires	8400	15104
Effective radius for dE/dx[mm]	752	928
Gas	He-C ₂ H ₆	He-C ₂ H ₆
Diameter of sense wire[mm]	30	30

PID(Particle identification)

2.4.1 節で述べた通り、B 中間子の物理を行なう上では K/ π 粒子識別が重要と
なっている。この為、高い精度での K/ π 粒子識別を行なう粒子識別 (PID) 装置の

2.5. Belle II 実験へのアップグレード

導入が Belle II 測定器には求められる。Belle 実験において K/ π 粒子識別は主に TOF と ACC が担っているが、高い Background 下で高い性能を達成する事は TOF では困難である。また、ACC に関しても 2.4.4 節で述べた問題が有る。この為に Belle II 測定器では新しいチェレンコフ検出器を新たな K/ π 粒子識別装置として導入する事が計画されている。その検出器が TOP (Time-Of-Propagation) カウンターと Aerogel RICH 検出器であり、barrel 部に TOP、endcap 部に Aerogel RICH 検出器が導入される予定である。TOP カウンターは輻射体に quartz を用いたチェレンコフ検出器であり、発生したチェレンコフ光を輻射体内部で反射させ、輻射体の端に設置された光検出器でチェレンコフ光を検出する (図 2.10)。このチェレンコフ光の光検出器の hit 位置と時間を用いる事によってチェレンコフ放射角を導出し、K/ π 粒子識別を行なう。この検出器を barrel 部に用いる事により、Belle II 測定器の内部から光検出器を排除する事ができ、設置空間と物質量が Belle 実験より減少する。

Endcap 部に導入される Aerogel RICH 検出器については次章 3 章で詳細に記述する。

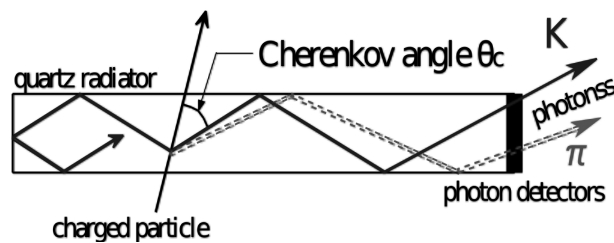


図 2.10: TOP カウンターでのチェレンコフ光の観測。

ECL

ECL のアップグレードとしては電子回路の改良が考えられている。改良点としては時定数を現在の $1\mu\text{s}$ から $0.5\mu\text{s}$ まで短縮し、約 2MHz での波形のサンプリングが計画されている。更に得られた波形の大きさ (すなわちエネルギー) と timing によって必要な信号と background を分離する。これによってエネルギー領域によって 4~7 倍まで background を減少させられると考えられている。しかし、この方法でも現在 Belle 実験で使われている CsI(Tl) のシンチレーション光の時定数 $\sim 1\mu\text{s}$ の制約を受ける。この為に多量の background が想定される endcap 部では CsI(Tl) よりも時定数の短い ($\sim 30\text{ ns}$) pure CsI を使用する事が計画されている。この pure CsI の導入と波形による解析によって endcap 部の background は 100 倍以上減少させる事ができる。

第2章 Belle 実験

KLM

Belle 実験で使用されている RPCs の検出効率は background rate に依存する。これは、荷電粒子通過の際の streamer discharge により近傍の電荷が無くなり、再び charge up するのに長い時間を有する為である。予想される Belle II 実験での KLM の background は barrel 部では $0.5\sim 4 \text{ Hz/cm}^2$ 、endcap 部では $2\sim 5 \text{ Hz/cm}^2$ となっている。この高い background 下では現在の KLM の検出効率は endcap 部 0%、barrel 部の内層と外層ではそれぞれ 80%、90% と予想され、endcap 部と barrel 部の内層において 90% 程度の効率を達成できるようにアップグレードが必要である。このアップグレードの案としては barrel 部に関してはガスの混合比の修正による dead time の短縮等を計画しており、予想よりも background が多かった場合には avalanche mode[20] での RPCs の使用が考えられている。対して、endcap 部では多量の background 下での RPCs の使用は困難な為、速い読み出しが可能な wave-length-shifting fiber を用いた scintillator counter の導入が計画されている。また、そこで用いられる光検出器としては GPD(Geiger Photo Diode) を予定している。

図 2.11 に現在計画されている Belle II 測定器の構造を、図 2.12 にその断面図を Belle 測定器と共に示す。

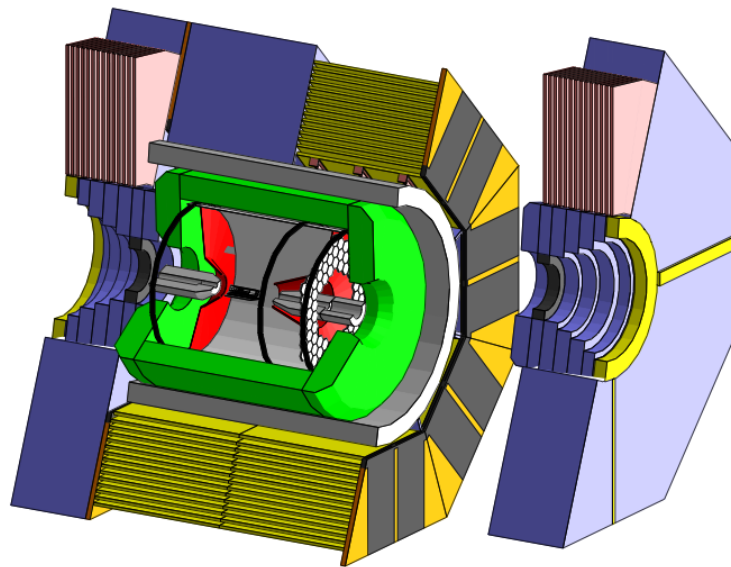


図 2.11: 計画中の Belle II 測定器。

2.5. Belle II 実験へのアップグレード

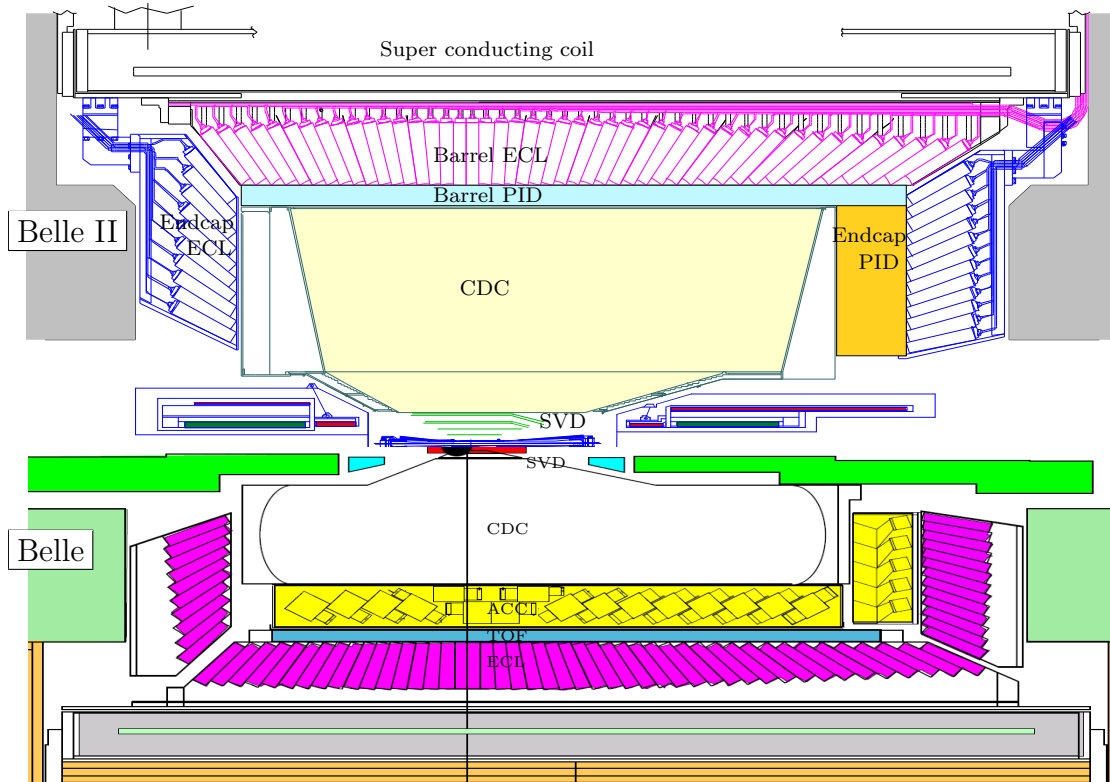


図 2.12: 計画中の Belle II 測定器 (上半分) と Belle 測定器の断面図 (下半分)。

第3章 Aerogel RICH 検出器

2.4節で述べたように、Belle II 実験では Belle 実験よりも更に精度の高い K/ π 粒子識別が必要となる。現在の Belle 測定器の K/ π 粒子識別能力では、CDC・TOF・ACC の 3 つの検出器での K/ π 粒子識別によって、全データ量に対して 90% の K 中間子を正しく同定し、10% の K 中間子を誤って π 中間子と同定 (fake rate) してしまっている。Belle II 実験では高精度の検出器を用いて、より高統計な測定で稀な事象の物理を捉える事を計画しており、全データ量に対して 95% の効率で K と π 粒子を検出し、fake rate を 1% 程度で K/ π 粒子識別を行なう事を目指している。特に endcap 部の ACC は 2.4.4 節で述べた問題点があり、Belle II 実験ではこれらの問題を改善し、高い K/ π 識別を可能としなくてはならない。

このような高い K/ π 粒子識別を可能とする為、K/ π 粒子識別を担う新型のチェレンコフ検出器の導入が計画されている。この新型チェレンコフ検出器として、RICH(Ring Imaging Cherenkov) 検出器を採用し、その開発を進めている [21]。RICH 検出器は 2 つの種類の検出器が Belle II 測定器に設置される予定となっており、barrel 部の K/ π 粒子識別検出器として TOP(Time-Of-Propagation) カウンター、endcap 部に endcap-ACC のアップグレードとして Aerogel RICH 検出器を採用し、開発が進められている。これらの検出器によって、K/ π 粒子識別運動量領域は

$$0.5 < p < 4.0[\text{GeV}/c]$$

となり、endcap 部でも高運動量領域での K/ π 粒子識別が可能となる。

この章では私が開発に関わっている Aerogel RICH 検出器について記述する。

3.1 原理と構造

RICH 検出器はチェレンコフ光を光検出器でリング状で測定する事によってチェレンコフ放射角 θ_c を導出し、 θ_c から粒子識別を行なう。チェレンコフ放射角 θ_c は式 2.1 で表され、粒子の運動量は式 2.4 で表されるので、この 2 つの式より、粒子の質量 m は運動量 p 、輻射体の屈折率 n 、チェレンコフ放射角 θ_c を用いて、

$$m = \frac{p}{c} \sqrt{n^2 \cos^2 \theta_c - 1} \quad (3.1)$$

3.1. 原理と構造

と表される。この式3.1より、輻射体の屈折率が一定で運動量とチェレンコフ放射角が測定できれば、輻射体を通過した荷電粒子の質量を導出し、その質量から粒子識別可能である事が分かる。ここで必要となる運動量はCDCによる測定で導出できる為、RICH 検出器で測定をする必要がある項目はチェレンコフ放射角となる。

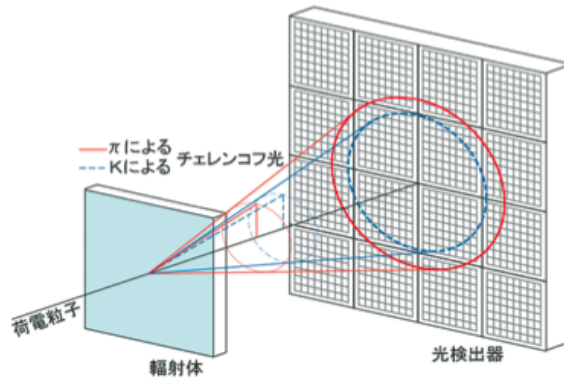


図 3.1: Proximity focusing A-RICH 検出器の構造と π/K 粒子識別。

Endcap 部に搭載される Aerogel RICH 検出器は輻射体として silica aerogel(詳細は2.4.3節に記述した)を使用し、aerogelから発生したチェレンコフ光を直接2次元の位置測定可能な光検出器でリング状で測定するという原理になっており、図3.1のような構造となっている(この様な構造のRICH検出器をproximity focusing RICHと呼ぶ)。図3.2で示す様にAerogelと光検出器の間隔を L 、光検出器で観測されたチェレンコフリングの半径を r とした時、粒子識別に必要な情報であるチェレンコフ放射角は、

$$\theta_c = \tan^{-1} \left(\frac{r}{L} \right) \quad (3.2)$$

と表される。

この様な構造のRICH検出器は検出器をコンパクトにする事ができる為、空間制約があるendcap部の使用に適している。また、RICH検出器ではACCの場合と異なりK中間子・ π 中間子のどちらの粒子が通過した場合でもチェレンコフ光が発生する為、ACCでの問題点であったKnock-on電子の影響を受けず、高運動量領域での粒子識別も可能となっているのでACCよりも高いK/ π 粒子識別能力を有している。

このAerogel RICH検出器では0.5~4.0 GeV/cの運動量領域において 4σ の精度でKと π が分離できる事を目標としており、4 GeV/cのK中間子と π 中間子のチェレンコフ放射角の差は約23 mradとなる。

第3章 Aerogel RICH 検出器

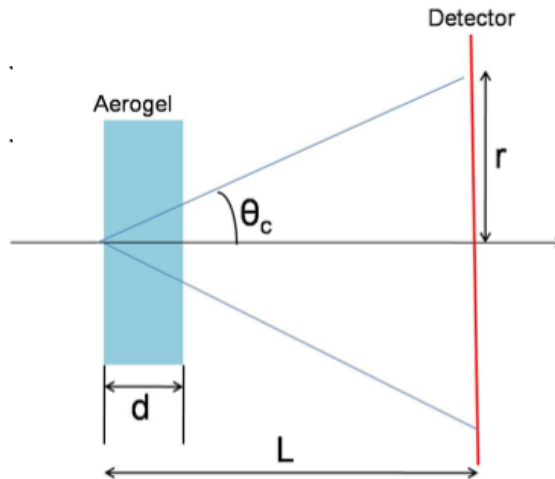


図 3.2: Aerogel RICH 検出器の各要素の配置図。

3.2 Aerogel RICH 検出器への要求

Aerogel RICH 検出器は空間制約のある Belle 測定器の endcap 部に設置される予定の為、空間制約 (CDC と Endcap ECL の間の奥行き 30cm が Aerogel RICH 検出器の設置空間) をクリアするようなコンパクトな検出器である事が求められている。また、Aerogel RICH 検出器の外側に設置されるカロリメータに悪影響を及ぼさないようになるべく物質量が少ない検出器である事も求められている。これらの要求と Aerogel RICH 検出器の目標性能を満たす為に、検出器に用いられる silica aerogel、光検出器、フロントエンドの読み出し回路には以下のような性能を持っている事が求められる。

Silica aerogel

- 検出光量を損なわない程度の高い透過率と、適切な屈折率と厚さである事。

光検出器

- Belle II 測定器での 1.5T の磁場中での安定動作
- 1 光子程度の微弱なチェレンコフ光を高い効率で検出できる事
- 十分な有効面積
- 位置分解能 ($\sim 5\text{mm}$)

- 中性子耐性

光検出器のフロントエンドでの読み出し回路

- 高利得・低雑音なアンプを有する
- 設置空間が小さい事
- 計 10 万チャンネルの同時読み出しが可能である事
- Belle II のデータ収集システムに対応可能である事

以上で挙げた条件を満たす物として、光検出器の候補の1つとして144チャンネルのHAPD(Hybrid Avalanche Photo Detector)が挙がっており、その読み出しとしてはASIC(Application Specific Integrated Circuit)を用いる事が計画されている。また、ASICのコントロール用のデジタル回路としてFPGA(Field Programmable Gate Array)を導入する。以下、この章においては144チャンネルのHAPDについて簡単に記述し、私の研究の主題である144チャンネルHAPD読み出し用のASICの開発状況については次章(第4章)で詳細に記述する

3.3 144 channel HAPD

前節でも述べた通り、Aerogel RICH 検出器は1.5Tの磁場が印加された Belle II 測定器内に設置される。このため、用いられる光検出器は磁場中で安定動作する事が求められる。さらに、Aerogel RICH 検出器ではチェレンコフ光つまり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要求も求められる。これらの要求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。そこで我々はマルチアノード型の Hybrid Avalanche Photo Detector(HAPD)を(株)浜松ホトニクスと共同開発を行なっている。HAPDは従来の光電子増倍管のような複雑なダイノード構造を持つ増幅部を用いない為、増幅揺らぎが非常に小さく、光電子数分解能や安定性において優れた性能を示す。

3.3.1 HAPDの動作原理

ここでは、HAPDの動作原理・構造を光電子増倍管との比較しながら説明する。図3.3は従来の光電子増倍管の構造及び光電子が増倍される過程を示す。光電子増倍管では、光子はphotocathodeで光電子を放出する。その後、真空管中の電場に

第3章 Aerogel RICH 検出器

よって、dynode に到達し、dynode で2次電子 (5~6 個) を放出する。さらに数段の dynode で構成された Dynode chain によって増倍過程が繰り返され、最終的な増幅率は $10^7 \sim 10^8$ に到達する。1 段目の dynode で放出される2次電子数が少ない為、信号の統計的な揺らぎは大きくなる。

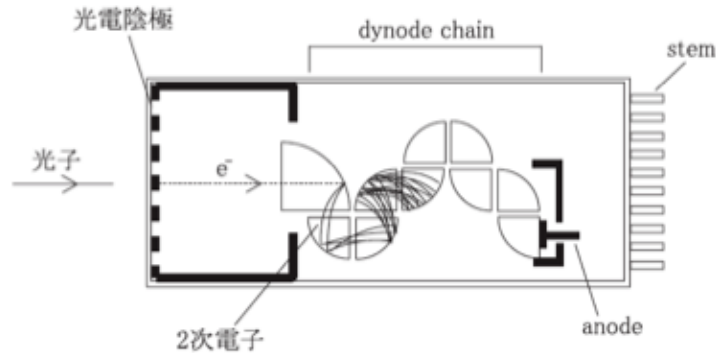


図 3.3: 光電子増倍管の構造。

一方、HAPD は図 3.4 のように、半導体検出器の APD (Avalanche Photo Diode) と光電子を加速させる真空管が組み合わさった構造をしている。photocathode から放出された光電子は photocathode と APD 面に印加された高電圧によって真空管内を加速し、APD に打ち込まれる。この電場加速によって得られたエネルギーによって APD 内に電子-正孔対が生成される。高電圧は -8kV 程度印加でき、Si 内では約 3.6eV で1対の電子・正孔対が生成されるため、電子打ち込みによる増幅率は 10^3 オーダーである。さらに、生成されたキャリアは APD に印加された逆 bias によって加速され、avalanche 領域に到達する。この領域ではダイオードに混入させる不純物濃度の違いにより、大きな電位差が生じている。これにより急激に加速されたキャリアが素子中の格子に衝突し、avalanche 増幅が起きる。この avalanche 増幅により、 10^1 のオーダーで増幅され、最終的な信号として出力される。これらの過程によって最終的な HAPD の増幅率は $10^4 \sim 10^5$ となる。HAPD は最初に電子打ち込みで増幅する為、光電子増倍管と比べ信号の統計的な揺らぎは少なくなる。また、APD をピクセル化する事によって多チャンネル化が可能となっている。

3.3.2 Aerogel RICH 検出器の為の 144 channel HAPD

144 チャンネルの HAPD は Aerogel RICH 検出器で用いる光検出器として開発された。その外形は図 3.5 のように、約 $72 \times 72 \times 30 \text{ mm}^3$ の角形をしており、その中に4つ APD チップが搭載されている。更に各 APD チップは 6×6 の1ピクセル

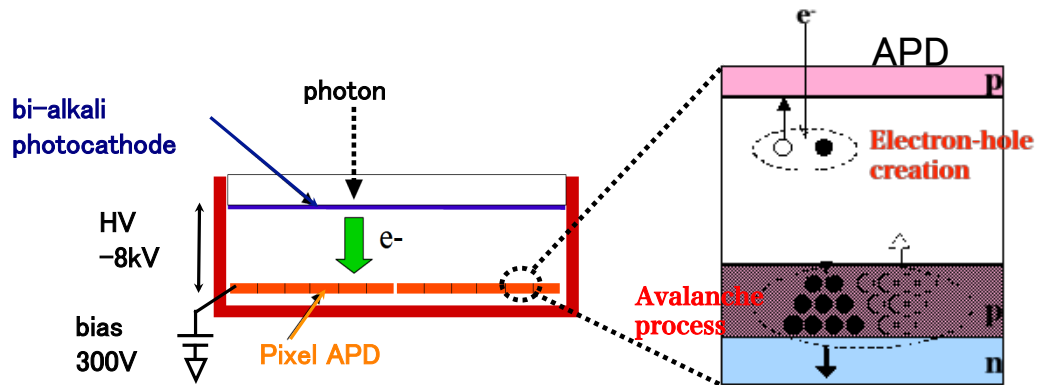


図 3.4: HAPD の構造。

4.9×4.9 mm² のサイズでピクセル化され、合計チャンネル数は 144 となっている。したがって、この HAPD の有効面積は 59×59 mm² となり、これは全体の 65% に相当している。また、入射窓の厚さは 4mm となっている (現在、高い量子効率を目指した HAPD を開発しており、そのサンプルでは background 低減の為、入射窓も 3mm に変更している)。

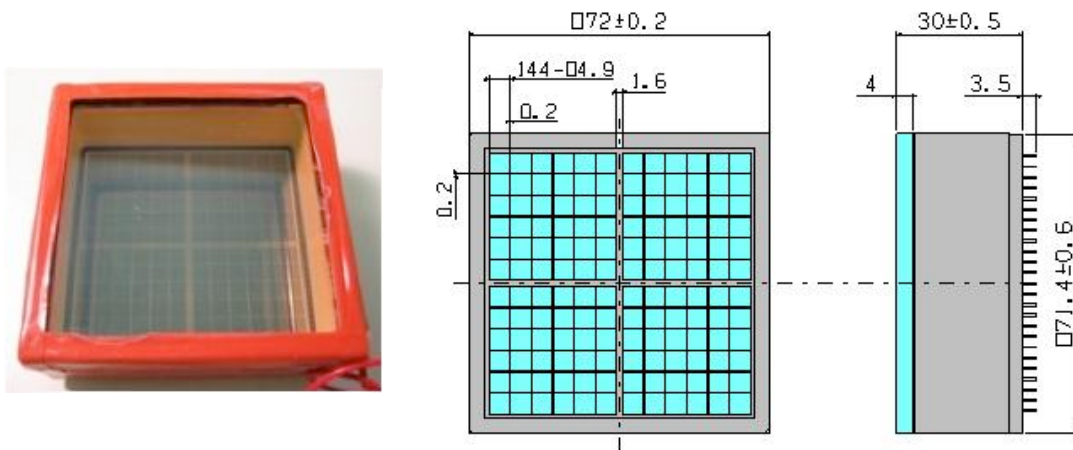


図 3.5: 144 チャンネル HAPD。

この HAPD は 3.2 節で示した光検出器の要求を満たすように設計されており、さらに磁場中での安定動作、中性子耐性についての試験も行なっている。これらの試験によって磁場中での動作に関しては問題が無い事が確認されており、中性子耐性については S/N 比の悪化等が見られており、改良と更に詳細な中性子照射試験が進められている (詳細については本研究の主題から多少外れる為、省略する)。なお、中性子により損傷を受けた HAPD での S/N 比の向上については読み出しに

第3章 Aerogel RICH 検出器

関係する為、その点に関する評価結果は5.5節で記述する。

第4章 144 channel HAPD 読み出し ASIC

3.3節で述べたように HAPD は、一般的な光電子増倍管等の光検出器と比較すると利得が低く、読み出しには高利得・低雑音の増幅器が必要となる。また、Aerogel RICH 検出器での使用を想定している HAPD は 144 チャンネルを有し、Belle II 測定器にインストールする際には 540 台の HAPD を使用する予定の為、計 8 万チャンネルに及ぶ信号を同時に読み出す事が可能な読み出しシステムが必要となる。しかし、市販の増幅器では設置空間の制限・コストの面からこれらの要求を満たす事は難しく、専用の読み出しシステムが必要となった。そこで、我々は HAPD 専用多チャンネル信号処理用 ASIC(Application Specific Integrated Circuit) の開発を進めている。

本章ではこれまでの開発経緯を記述した後、現在試作開発されている最新型の ASIC の開発状況について説明する。

4.1 開発経緯と回路構成

今までに開発された 144 チャンネル HAPD 専用の ASIC 試作としては 2003 年に 1st version である「S01」を開発し、ほぼ 1 年毎に 2nd、3rd、4th version である「S02」「S03」「S04」(S-series) の試作・評価を行なってきた。この S-series の最終 version である S04 において目標性能をほぼ満たしたが、更に実用的で柔軟な読み出しを目指した新しい ASIC(SA-series) を 2007 年から開発を行なっている。

以下、この節では ASIC の構成についての概要を述べた後、S-series、SA-series 各々の回路構成・特徴を記述する。

4.1.1 ASIC の構成概念

3.2 節でも記述した通り、144 チャンネル HAPD 読み出し用 ASIC に求められる要求は、以下の通りである。

第4章 144 channel HAPD 読み出し ASIC

- 高利得・低雑音 (目標入力換算雑音レベル:1200e⁻) のアンプ機能 (HAPD 自身の増幅率が低い事と 1 光子信号検出の為)
- システム集積化 (コストと Belle II 測定器の組み込む際に設置空間が限定される為)
- 多チャンネル同時読み出し (144 チャンネル × 540 台)
- Belle II のデータ収集システムに対応

実際に Aerogel RICH 検出器がは多くのチャンネルを有している為、全チャンネルからの信号の波高値をデジタル化し、後段のシステムに送信する事は多大な時間が必要となりデータ量を大きくしてしまう。そのため、HAPD 読み出し ASIC は HAPD からの信号を波高値ではなくビット情報で処理する事で信号処理の時間を短縮し、設置空間を節約できるように設計された。

Aerogel RICH 検出器は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、入射粒子の同定を行なう為、重要な情報は「HAPD のどの位置に光が入射したか」である。この事から、信号の波高値の処理は必要なく、hit の有無のビット情報のみで十分となっている。しかし、それを精度良く測定する為には HAPD の信号に対して高い S/N を保持したまま処理する必要がある。また、HAPD の信号を処理した後、外部からの読み出しが始まるまである程度の時間だけ、信号を保持しなければならない。したがって、ASIC の回路構成は HAPD からの信号を増幅し、ビット化する analog 部とビット化された情報を処理し保持する digital 部からなる (ただし、SA-series ではビット化された情報の処理を行なう digital 部は ASIC 外部の他の集積回路が担う)。

4.1.2 S-series

S-series は 144 チャンネル HAPD の読み出し用として開発された評価用の ASIC である。この回路の構成は 4.1.1 節で述べた要求を満たす様に設計されており、回路の構成に関しては一般的な検出器読み出し回路を参考にしたものとなっている。

以下に、S-series の回路構成と開発経緯を記述する。

回路構成

S-series における各チャンネルでの信号処理の為の主要回路は図 4.1 のようになり、アナログ部は前置増幅器、整形増幅器、可変利得増幅器の計 3 段の増幅器

4.1. 開発経緯と回路構成

と、増幅器からのアナログ出力をデジタルビット信号に変換する為のコンパレータから構成される。デジタル部はアナログ部を通った有為な信号に対して処理を施し出力をデジタル化する。デジタル部はデジタル情報を保持しておくシフトレジスタで構成されている。以下に、各回路の特徴を記述する。

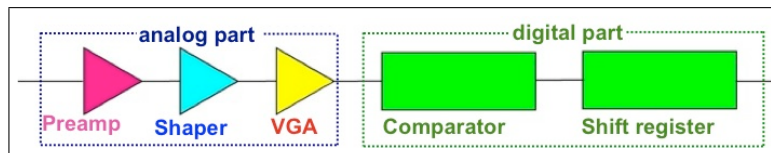


図 4.1: S-series 回路構成 (1 チャンネルの HAPD 信号処理過程)。

前置増幅器 (Preamp)

増幅器初段に配置された荷電積分型の前置増幅器である。その増幅率は外部スイッチによって 10 mV/fC と 5 mV/fC の 2 つを選択できるようになっている。

整形増幅器 (Shaper)

増幅器の 2 段目は整形増幅器となっており、Pole-Zero 補償回路、そして非反転増幅器で構成される。前者は前置増幅器からの信号の減衰時定数を短縮する効果があり、後者は後段増幅器及び digital 部への雑音対策の為に設置している。

可変利得増幅器 (VGA : Variable gain amplifier)

増幅器の 3 段目は HAPD の増幅率が低い事を受けて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ようになっている。さらに付属した DAC 回路により、出力信号の offset を ± 150 mV の範囲で調節できる。

コンパレータ (Comparator)

コンパレータ部では、各 ASIC 毎に設定される threshold 電圧が参照用電圧として送られており、VGA からの出力信号の波高値が、この threshold 電圧を超えた際にビット信号を出力する。この threshold 電圧は ASIC 内の全チャンネルに共通で与えられる為、各々チャンネルに適切な threshold 設定を行なう為には VGA に付属する offset 調節機能を用いる。

シフトレジスタ (Shift register)

シフトレジスタは、コンパレータからのビット信号からトリガー信号を出力するとともに、16 個の DFF(D-type flip-flop) 回路によりチップ動作周波数の 16 ク

第4章 144 channel HAPD 読み出し ASIC

ロック分だけビット信号を保持するようになっている。チップ動作周波数は1~10 MHzを想定しているため、シフトレジスタでは約1.6~16 μs だけデータ保持が可能となっている。また、信号を外部に出力する際には各チャンネルの上位4ビットをシフトレジスタで押し出す事によって、全チャンネルのデータをシリアルで出力する。この最終出力信号は、デジタル部からアナログ部への影響を少なくし、長距離の信号伝送を可能とする為 LVDS(Low Voltage Differential Signaling) で出力される。

S-series の開発経緯

S-series の ASIC は 2003 年に 1st version である S01 を試作・評価を行い、評価で見つかった問題点を改善しながら S02、S03、S04 とほぼ 1 年毎に新たに試作していった。この最終版である S04 において要求性能をほぼ満たし、より実用的な ASIC である SA-series の開発に進む事となった。以下に、S01~S04 までの開発経緯をそれぞれの特徴・問題点及びその解決策と共に記述する。

S01

S01 は 2003 年に HPD(APD ではなく PD を配置した物の為、HAPD よりも低利得) 処理用 ASIC として開発された ASIC である (詳細については参考文献 [23] を参照)。この S01 で見つかった課題は、

1. アナログ入力部が DC 結合であった為、定常的に流れる直流成分により各チャンネル間の offset 値が大きくなってしまい、offset 調節可能範囲 ± 30 mV を超えていた。
2. 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しまっている (アナログ-デジタル間の信号の干渉)。

である。対策としては、アナログ信号処理回路を AC 結合方式に変える事により、直流成分を取り除く事と、新たなパッドの導入が考えられた。

S02

S01 での課題・対策を元に、新たに HAPD 処理用 ASIC として開発された ASIC である。S01 での問題の改善が確認されたが、以下の問題が新たに見つかった。

1. 電子雑音レベルが検出器容量 80 pF において、設計上では $1800e^-$ であるが、実際の測定では $4000e^-$ と大幅におおきい。

4.1. 開発経緯と回路構成

2. 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。
3. offset 調節がほとんど効いていない。

1つ目の問題に関しては、トランジスタ用バイアス回路にミラー容量を追加し、高周波雑音を低減させる事によって改善が可能である。2つ目に関してはトランジスタ用バイアス回路に対電源レベルに向けて10pFの容量を入れる事により電源変動の対策が出来る。さらに、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させる事も対策として考えられた。3つ目の対策としては、offset adjust 信号生成用の負荷抵抗を20k Ω から1k Ω へ変更が考えられた。

S03

S03は2005年に試作された3rd versionのASICであり、S01、S02での課題も克服し、目指す性能にかなり近づいたものとなった(詳細は参考文献[24]を参照)。しかし、以下の点について大きな問題が見つかった。

1. 定容量におけるゲインブースト回路による発振
2. 回路が安定に動作するまでに2時間以上に時間がかかる。

1つ目の問題として挙げた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上げる目的でS03で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領域を逸脱するという現象が見られた。この対策としてはゲインブースト回路のカスコード接続部を改良し、動作を速くする事が考えられた。また、2つ目に関しては、回路の安定化を図る目的で前置増幅器のバイアス回路に設置されたRC回路が安定に動作するまでに充電時間が約2時間必要となる為であると考えられた。その対策としてRC回路に直接初期化信号を送る事によって、充電時間を経ずに安定動作を行なえるようにする事を考えた。

S04

S04はS03まででの問題を改良し、2006年に試作されたASICである。このS04において要求性能をほぼ満たす事に成功した。その仕様と動作検証結果から分かった性能を図4.1に示す(詳細な性能評価の結果等は参考文献[25]を参照)。また、2008年・2009年に行なわれたプロトタイプA-RICH検出器ビームテスト([26],[27]、5章を参照)において読み出し回路として用いられ、チェレンコフリングの観測にも成功している。これらの結果より、S04はA-RICH検出器の読み出し回路として

第4章 144 channel HAPD 読み出し ASIC

十分な性能を有している事が分かったが、デジタル部の信号読み出し方式が固定されている為、Belle II のデータ収集システムで考えられている様々な読み出し方式に柔軟に対応できない。この点を改善し、Belle II のデータ収集システムに対応できるように考えた ASIC が後述する SA-series である。

表 4.1: S04 の仕様と動作検証結果

	仕様と動作検証結果
プロセス	ROHM CMOS 0.35 μm
PolySi 層	2 層
Metal 層	3 層
電源電圧	2.0/-1.3 V
パッド数	144
パッケージ	セラミック QFP160
チャンネル数	18
チップサイズ	4.93 \times 4.93mm ²
雑音レベル	1800e ⁻ @80pF
標準入力信号	12000e ⁻
offset 調節	11mV 毎

4.1.3 SA-series

SA-series は Belle II での実用化に向けて、機能を追加し、より実用的で柔軟な対応を可能とする ASIC として 2008 年から試作・評価をすすめており、現在 SA01(1st version)、SA02(2nd version) の 2 種類のチップが試作されている。その SA-series からの大きな変更点としては、

1. S-series でデジタル信号処理を行っていたシフトレジスタを IC 内から排除し、デジタル・アナログの分離を行なった。
2. 可変利得増幅器を廃し、増幅回路を前置増幅器と整形増幅器のみとした。
3. 整形時定数・増幅率等の設定をパラメータで設定できるようになった。
4. 任意のチャンネルのモニター信号が出力できるようになった。

4.1. 開発経緯と回路構成

である。1つ目に関しては、デジタル信号処理部分をIC外部に置く事により、ノイズの原因となるデジタル・アナログの混在をやめる為と、デジタル処理を外部のFPGA(Field Programmable Gate Array)で行なう事によって、柔軟な読み出しを可能にし、Belle IIのデータ収集システムに対応できるようにする為である。2つ目に関しては、HAPDの増幅率を開発当初より高くする事に成功した為、前置増幅器1段のみの増幅で十分になった為である。これらの変更によって、SA-seriesの信号処理部分の回路は図4.2のように前置増幅器・整形増幅器・コンパレータのアナログ部で構成され、デジタル部は増幅率・offset等のパラメータ設定を行なう回路で構成されている。以下に各回路の特徴を記述する。

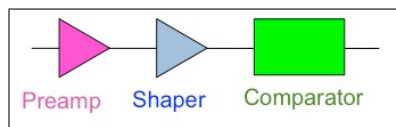


図 4.2: SA-series 回路構成 (1チャンネルのアナログ回路の構成)。

前置増幅器

S-seriesと同様に荷電積分型の増幅器である。SA01の前置増幅器は内部に設けられたスイッチによって帰還容量を切り替える事が可能となっており、4段階で利得が調節可能となっている(図4.3-(a))。

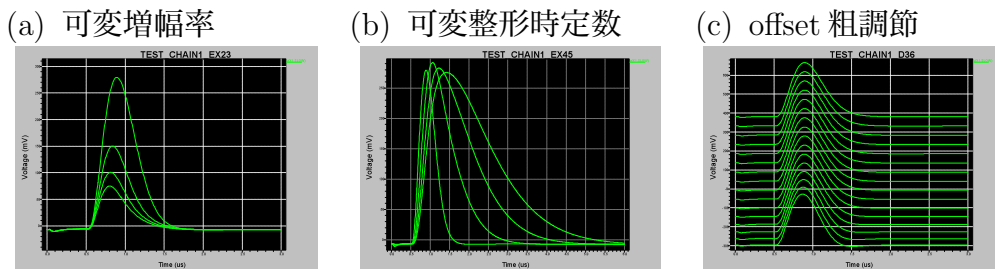


図 4.3: SA-seriesの増幅器後のアナログ信号。(a)前置増幅器の増幅率(4段階)を変化させた場合。(b)整形増幅器の整形時定数(4段階)を変化させた場合。(c)offset粗調節(16段階)を変化させた場合。

整形増幅器

S-seriesと同様に Pole-Zero 補償回路・増幅回路から構成されており、offset 調節回路が付随している。SA-seriesとは異なり、整形時定数を内部スイッチで調整する事ができ、peaking timeが約250、500、750、および1000nsとなるように調節可能となっている(図4.3-(b))。

第4章 144 channel HAPD 読み出し ASIC

また、offset 調節回路は粗調節、微調節の2つの回路で構成されており、各回路において4bitでの調節が可能となっている。これにより、1つの offset 調節回路で5bitで設定していたS-seriesより細かく offset 調節可能となっている(図4.3-(c))。

コンパレータ

SA-seriesにはリーディング型コンパレータ(図4.4-(左))とゼロクロス型のコンパレータ(図4.4-(右))の2つのコンパレータが備わっている。リーディング型コンパレータは従来の方式と同様に、増幅段からのアナログ出力の波高が外部から入力される threshold 電圧より高ければデジタル信号を出力する。これに対して、ゼロクロス型のコンパレータはアナログ入力信号を微分し、その微分波形がベースライン(SA02では threshold 電圧)を超え、かつリーディング型コンパレータで hit があった場合のみ hit 信号を出力する。このゼロクロス型では元の波形の尖塔値を検出する為、出力信号のタイミングが入力信号の波高依存性を持たない。

SA-seriesの最終出力はこの2つのコンパレータからの出力を内部スイッチで選択し、後段のDRIVE回路によって出力される。

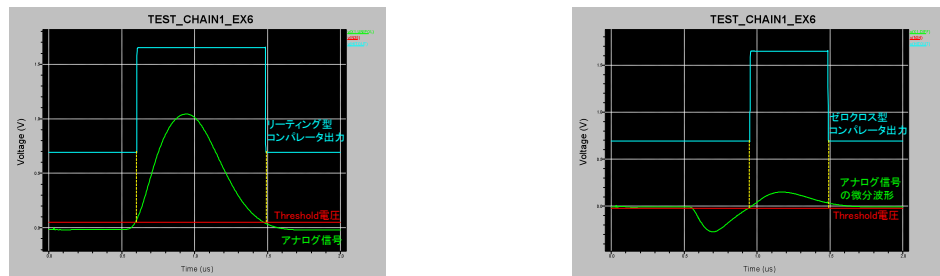


図 4.4: SA-series の入力信号 (増幅器のアナログ信号) とコンパレータの出力 (左: リーディング型、右: ゼロクロス型)。

パラメータ設定回路 (デジタル回路)

前述したように、SA-seriesではデジタル処理回路が外部に移動した為、ASIC内のデジタル回路はパラメータ設定を行なう回路のみとなっている。ASICで設定可能なパラメータはチップ内の全てのチャンネルに同一の設定を行なう global parameter と各チャンネル毎に設定可能な channel parameter の2種類が存在する(したがって、SA-seriesには global parameter 設定用の回路が1つと channel parameter 設定用の回路が全チャンネル数分搭載されている)。これら2つのパラメータ設定で変更可能なものは、

- global parameter

4.1. 開発経緯と回路構成

- 前置増幅器内に設けた位相補償用の MOS キャパシタンスの容量の設定 (2bit)
 - 前置増幅器の増幅率 (2bit)、整形増幅器の整形時定数 (2bit)、コンパレータの選択 (1bit)
 - 最終段の DRIVE 回路の出力のパワー (8bit)
 - 出力する monitor 信号の選択 (2bit)。漏れ電流の Monitor、前置増幅器の出力、アナログ最終出力、アナログ出力の微分波形の 4 つを選択。
- channel parameter
 - 前置増幅器の時定数 (3bit)、offset 粗調節 (4bit)、offset 微調節 (4bit、微分信号に対して更に 4bit)
 - テストパルス入力の on/off(1bit)。0 が on で 1 が off。
 - コンパレータの KILL 信号 (1bit)。1 の時はコンパレータから出力無し。

である (括弧内は何 bit で設定できるかを示す)。

図 4.5 がパラメータを設定する回路の回路構成である (この図では、global parameter 設定用の回路を示すが、channel parameter 設定用回路は同一の回路構成である)。このパラメータを設定する回路は複数個の EDFFF(Enable 端子付き D-type flip-flop) で構成されるシフトレジスタである。この各 EDFFF の出力が上述したアナログ部回路内のスイッチに入力される事によって、パラメータの変更が可能となっており、IC 外部から data 信号 (din)、clock 信号 (wck)、enable 信号 (wr) を入力しパラメータ設定を行なう。また、SA-series では任意の 1 チャンネルのアナログ信号を monitor 信号として出力できるようになっており、monitor するチャンネルの選択もシフトレジスタで構成される回路 (ただし、この回路は DFF で構成される) によって行なわれる。なお、このチャンネル選択はパラメータ設定の際にも適用され、選択されたチャンネルのみパラメータ設定される。このため、チャンネル選択用のシフトレジスタはチャンネル数に global parameter 設定分を加えた個数分の DFF で構成される (すなわち、(チャンネル数+1) 個の DFF)。チャンネル選択用のシフトレジスタ回路は IC 外部から data 信号 (selin)、clock 信号 (selck) を入力し、入力が high、出力が Low になっている DFF に対応するチャンネルが選択されるようになっている。すなわち、selin が high となっている間 (low の場合は初期化される) に入力された selck の clock 数が選択されるチャンネルに対応する (ただし、0 個の場合は global parameter 設定が選択され、1 個の場合が ch0 となり、以降 clock 数とチャンネルが 1 つズれる)。図 4.6 にチャンネル選択時に入力される信号とその時に設定されるチャンネルを示す。

第4章 144 channel HAPD 読み出し ASIC

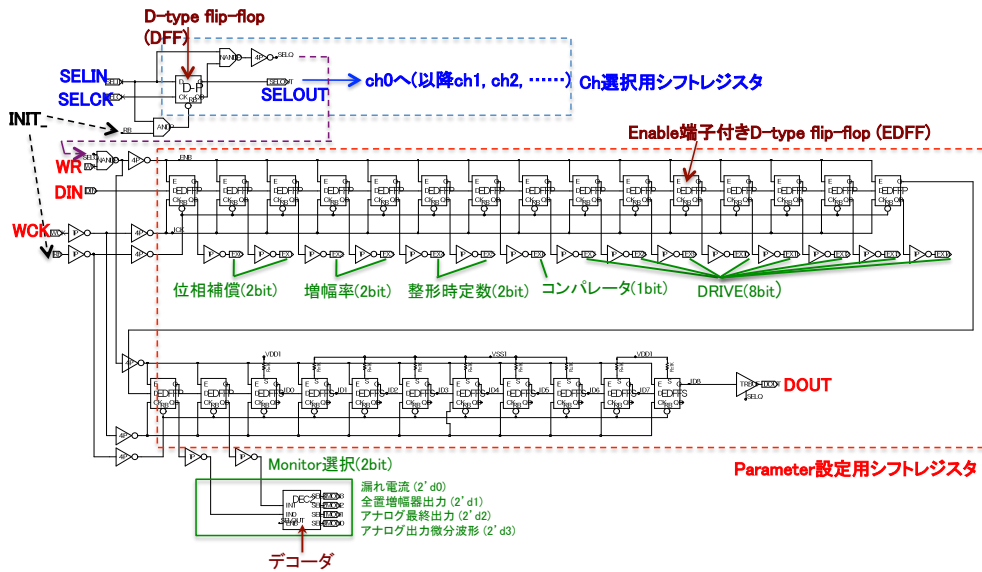


図 4.5: パラメータ設定回路 (global parameter) の構成。Channel parameter 設定回路も構成は同一 (EDFF の個数は異なる)。SELIN, SELCK, WR, WCK, DIN, INIT が IC 外部から入力され、パラメータ設定用とチャンネル選択用のシフトレジスタの最上位 bit が IC 外部に出力される (DOUT, SELOUT)。

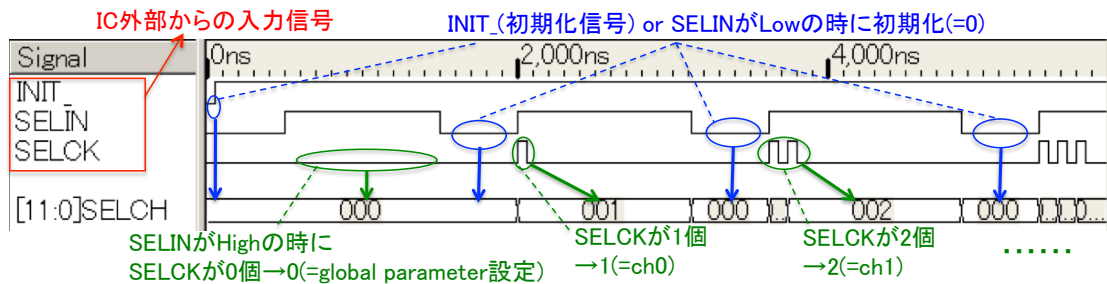


図 4.6: SA-series でのチャンネル選択時の入力信号。INIT, SELIN, SELCK を IC の外部から入力する。SELCH は選択されたチャンネルを示している。

4.2 SA01

SA01 は SA-series の 1st version として 2008 年に試作された ASIC である。S-series はローム株式会社の $0.35\mu\text{m}$ プロセスで試作を行っていたが、SA01 は台湾の TSMC 社の $0.35\mu\text{m}$ Mixed mode(MOSIS) にて試作を行なった。また、SA01 は SA-series の動作確認を目的としたものである為、チャンネル数は 12 のみとなっている。

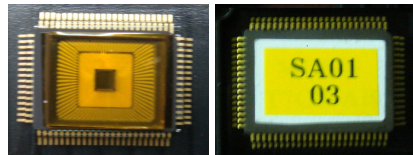


図 4.7: SA01 の写真。

4.2.1 性能

図 4.8 は SA01 の性能評価の結果を示している (性能評価では 4.2.2 で説明する threshold scan を行い、信号波高と noise を見積もった。詳細については参考文献 [26] を参照)。(a) は各増幅率設定での入力信号と増幅器段の後のアナログ信号の波高の関係を表している。この結果から、増幅器の増幅率は約 71、89、122、および 291 mV/fC で調整可能となっている事が分かる。この増幅率は 1 光子信号検出する上で問題無い値となっている。しかし、HAPD からの 1 光電子相当信号の $60,000e^-$ (HAPD の増幅率を 60,000 にした時) を入力した場合、低増幅率設定であっても、saturate してしまう。この事は hit の有無を検出する上では大きな問題とはならないが、S/N 比を高くする為には HAPD の増幅率をなるべく高くし、その 1 光電子相当信号の周辺で線形性を保てるような増幅器を使用する事が求められる (SA02 において改善)。(b) は noise の入力容量の依存性を表しており、HAPD の検出器容量である 80pF での noise は約 $1200e^-$ となった。この noise は目標としている noise level を達成しており、十分に小さい noise level となっている。

これらの性能評価等の結果より SA01 は Aerogel RICH 検出器で使用する上で問題ない事が分かり、チャンネル数を増やした SA02 の開発に進む事になった (SA02 に関しては 4.3 節に記述)。

表 4.2 に SA01 の仕様と性能評価の結果を示す。

第4章 144 channel HAPD 読み出し ASIC

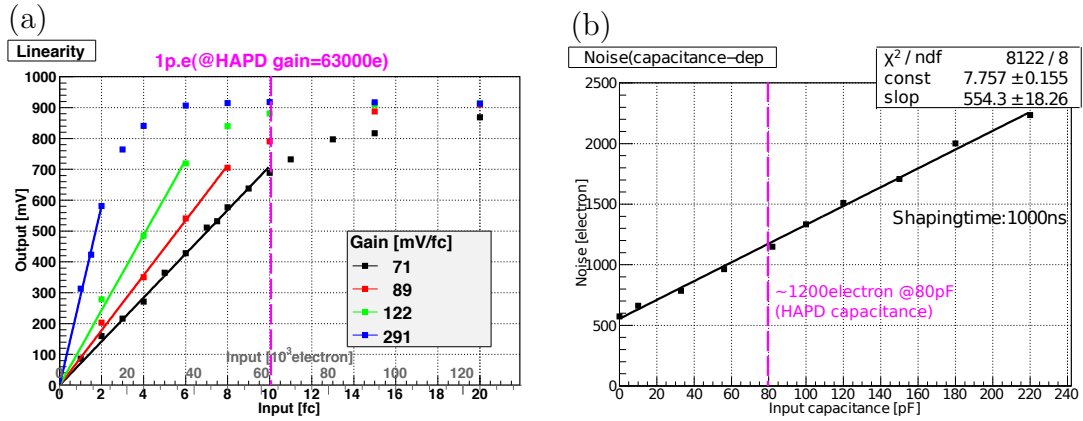


図 4.8: SA01 の性能。(a) 各増幅率設定 (4 段階) におけるアンプの線形性。(b) 整形時定数 1000ns における noise の入力容量依存性。

表 4.2: SA01 の仕様と動作検証結果。

	仕様と動作検証結果
プロセス	TSMC CMOS 0.35 μ m
PolySi 層	2 層
Metal 層	3 層
電源電圧	1.65/-1.65 V
パッド数	80
パッケージ	80p QFP
チャンネル数	12
チップサイズ	3.0 \times 3.0mm ²
雑音レベル	1200e ⁻ @80pF
プリアンプ増幅率	約 71, 89, 122, 291 mV/fC
整形時定数の時定数 (ピーキングタイム)	250, 500, 750, 1000 ns
offset 調節 (各 16 段階)	粗調節: 約 59mV 毎 微調節: 約 5mV 毎 (各 16 段階)

4.2.2 ASIC と FPGA による HAPD 信号読み出し

4.1.3 節で述べたように、SA-series ではデジタル信号の処理回路を ASIC の内部から取り除き、デジタル処理を FPGA で行なう事とした。FPGA は ASIC と異なりプログラムをダウンロードし直す事によって何度でも回路を書き直す事ができる為、FPGA の導入によって Belle II のデータ収集システムに容易に対応させる事ができると考えられる。

図 4.9 は SA01 と FPGA を用いた 144 チャンネル HAPD 用のテストボードである。このボードには SA01 が 3 つ搭載されている為、HAPD の APD1 チップを読み出せるようにされている (144 チャンネル HAPD の全チャンネルを読み出す為にはこのボードが 4 枚必要)。また、FPGA は 1 チップ搭載されており、使用した FPGA は Xilinx 社製の Spartan-3 ファミリーの xc3s400-4pq208 である。この FPGA にはボードに搭載されている発振器から 48MHz の clock を入力して動作させている。以下に FPGA にダウンロードした回路についてと、この FPGA と SA01 搭載ボードの動作検証について記述する。

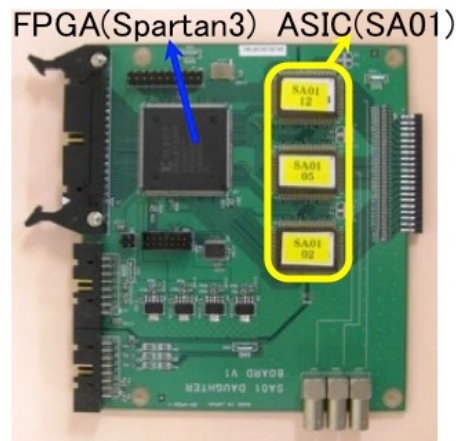


図 4.9: FPGA を搭載した SA01 のテストボード。

FPGA にダウンロードした回路構成

FPGA が担う主な役割は、ASIC からの hit 信号を処理し、後段の電子回路に効率良く伝送する事である。また、後段のシステムから受信した信号によって ASIC の増幅率等のパラメータ設定の変更も行なう。以下に、今回の性能評価・ビームテストの際に FPGA にダウンロードした回路について記述する。

入出力信号レベル変換回路

FPGA の標準の入出力の信号レベルは LVCMOS(3.3V) となっている。しかし、後段の読み出しシステムとの通信には S-series と同様に LVDS 信号で行なう方が望ましい。また、ASIC の電源電圧は $\pm 1.65\text{V}$ となっている為、FPGA と ASIC の間を伝送する信号もこの電源電圧に合わせた物とする必要がある。したがって、ASIC からの入力信号は LVCMOS(1.8V)、ASIC への出力信号は LVCMOS(1.5V)、後段の読み出しシステムへの入出力信号は LVDS に変換を行なう回路を入出力端子の前に設けている。

パラメータ設定回路

4.1.3 節で述べたように SA-series は増幅率等の global parameter と offset 調節等の channel parameter が設定できる。この他に、FPGA 内でデータ処理する際のパラメータとして、

- ASIC からの hit データを保持する時間 (hd_cycle)。
- 内部 trigger 信号のタイミング (trgdelay)。
- 後段のシステムに送る hit の有無のデータの判定方法の選択 (mode_edge)。

も設定できる (これらのパラメータの詳細は次の信号処理回路の段落で説明する)。この3種類のパラメータは (global parameter, channel parameter, データ処理用のパラメータ) は後段のシステムからの設定値を入力する事によって、FPGA 内の回路変更無しで変更が可能となっている。つまり、パラメータ設定回路は後段のシステムからの入力信号からパラメータの設定値を認識し、global parameter, channel parameter の場合は ASIC の入力信号 (wr, wck, din) を生成し、データ処理用のパラメータの場合は FPGA 内の内部信号 (hd_cycle, trgdelay, mode_edge) の値を変更する回路となっている。また、同様に ASIC の monitor チャンネル (パラメータ設定するチャンネル) も後段のシステムからの信号よりチャンネル選択信号 (selin, selck) を生成して行なう。なお、後段からのシステムからの入力信号は設定パラメータ識別信号 (4bit) を設定値に付加した形式の信号 (シリアル信号) として入力し、設定パラメータの種類は 4bit の識別信号で区別できるようになっている。この識別信号のみの 4bit の信号のみを入力した場合は 現在設定されている値を後段のシステムへ出力し、設定値の確認も可能にしてある (ただし、global parameter, channel parameter の設定時は ASIC の dout 出力から設定前の値を取得し、後段のシステムへ出力するようになっている)。

ASIC からの出力信号処理回路

本研究において FPGA にダウンロードしたデータ処理回路は S-series のデジタル処理回路を参考にした回路となっている。その回路による ASIC からの信号処理のタイミング・チャートを図 4.10 に示す。

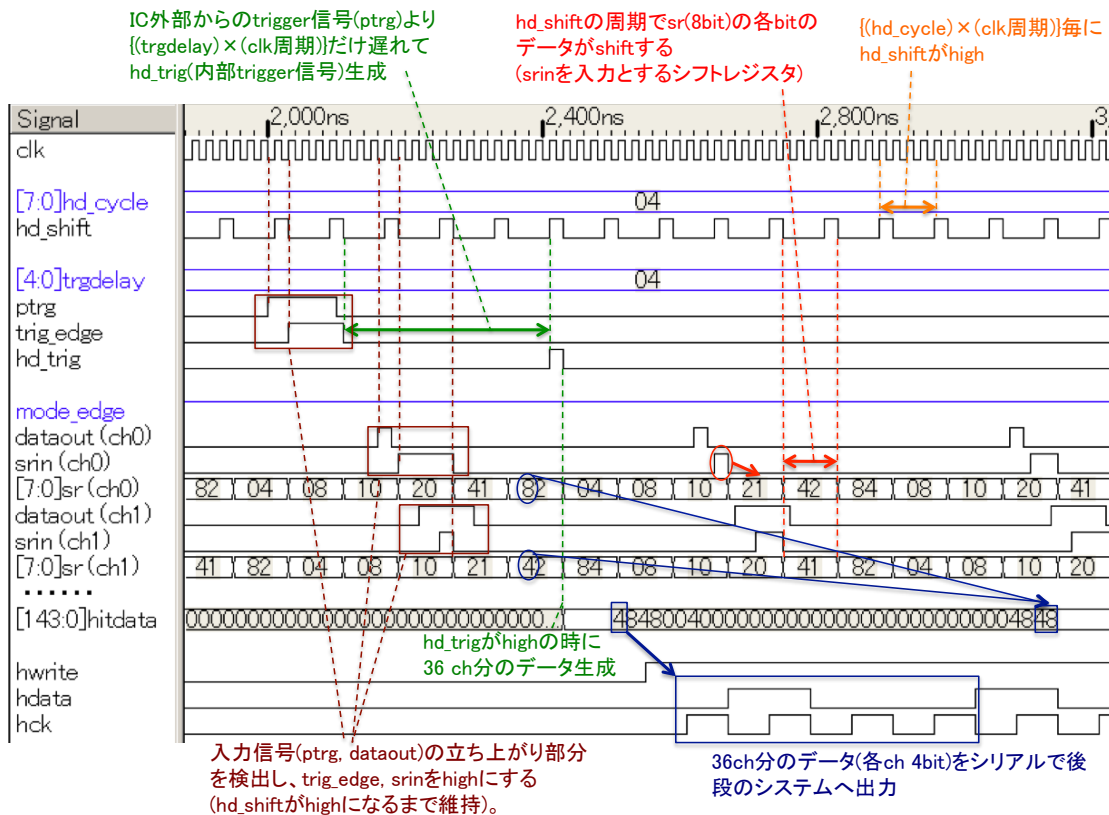


図 4.10: FPGA で行なう ASIC からの hit 信号 (図中の dataout が対応) の処理。信号名を青で示したものは IC 外部からの入力信号で変更可能。ptrg, dataout, hwrite, hdata, hck が FPGA の入出力信号でそれ以外は内部信号 (ただし、clock 信号 (clk) も外部から 48MHz で供給)。

ASIC からの出力信号 (dataout) は clock 信号 (clk) が立ち上がるタイミングで取得される。その際に、FPGA の内部パラメータ mode_edge の値が high の場合は ASIC からの出力信号が立ち上がった瞬間のみを hit 有りとしてデータを生成し、low の場合は ASIC からの信号をそのままデータとする (図 4.10 では mode_edge を high とした場合を示しており、以降の測定は全てこの設定で行なっている)。生成されたデータ (srin) は FPGA 内部に設けられたシフトレジスタによって一定時間保持される。このシフトレジスタにおいてデータを shift するタイミングは内部

第4章 144 channel HAPD 読み出し ASIC

パラメータ `hd_cycle` によって決められ、clock 周期の `hd_cycle` 倍の周期で動作する。なお、このシフトレジスタが動作するタイミングに `hd_shift` という内部信号が生成され、取得データ (`srin`) は一度 high になったら `hd_shift` が high になるまで状態を保持している。このため、ASIC からの信号から hit の有無を確認する時間 (time-window) は clock 周期の `hd_cycle` 倍となる (clock は 48MHz なので `hd_cycle` が 1 の時は、time-window は約 20nsec)。シフトレジスタに保持されたデータは内部 trigger 信号 (`hd_trig`) によって、上位 4bit のデータが後段のシステムに送る信号 (`hitdata`) として取得され、36 チャンネル分をまとめて出力される (`hwrite`, `hdata`, `hck`)。ここで述べた内部 trigger 信号は外部から入力される trigger 信号 (`ptrg`) の立ち上がりの瞬間から `hd_shift` が `trgdelay` 回立ち上がった瞬間に生成される。前述した通り、`trgdelay`, `hd_cycle` は変更可能となっており、これらのパラメータを変更する事によってデータ取得のタイミングと time-window を調節する事が可能となっている。

HAPD に接続しての動作検証

これまでの SA01 単体での性能評価によって、SA01 単体が Aerogel RICH 検出器の読み出し回路として十分な性能を有している事が確認できている。ここでは、FPGA と SA01 を搭載したボード (図 4.9) を用いて 144 チャンネル HAPD の信号を読み出す事により、FPGA を導入した読み出し回路の動作検証試験を行った。

Set-up

図 4.11 に HAPD 接続時の動作検証試験のセットアップを示す。HAPD とテストボードは暗箱内に設置し、LED で HAPD に光を照射して測定を行なった。PC との通信は VME モジュール (PTS) で行なわれ、このモジュールによって HAPD からの hit データの取得と ASIC のパラメータ設定等のコントロールを PC で実行可能となっている。この動作試験では HAPD の増幅率は約 32,000 にして測定を行った (HAPD の増幅率はもっと高くする事が可能だが、増幅回路が 1 光電子信号で saturate しないように低い設定にしてある)。なお、以下の ASIC の動作検証、ビームテストでの SA01(SA02) の設定は、特別な記述が無い限り増幅率を最低にし、整形時定数を最大にして測定している。このセットアップで以下の 2 つの測定を行なった。

- Threshold Scan
- 2-dimensional Scan

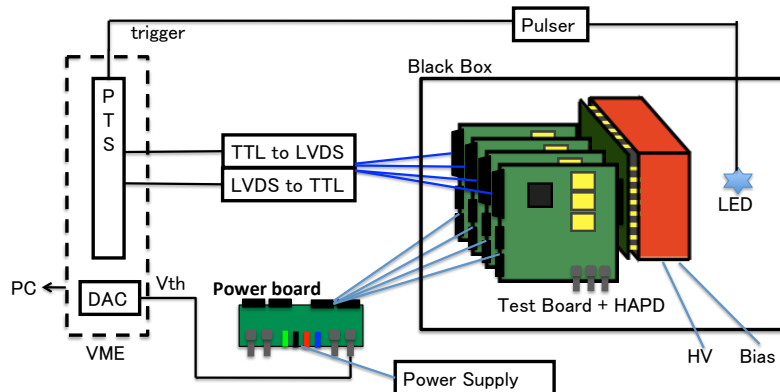


図 4.11: HAPD 信号読み出し試験の Set-up。

Threshold Scan

144 チャンネル HAPD 読み出し用 ASIC の出力が hit の有無のデジタル信号である為、ASIC の内部の増幅段後のアナログ出力波形の評価を直接行なう事ができない (アナログ信号の為の monitor 出力がついてるが 1 チャンネル分しか同時に出力できない)。したがって、ASIC 内部のアナログ信号の評価は以下の手順で行なう (Threshold Scan)。

1. コンパレータに入力する threshold 電圧を変化させ、各 threshold 電圧における ASIC からの hit 出力の頻度を得る。
2. 得られた “threshold 電圧 vs 出力頻度” の関係をプロットし、ガウス関数を積分した関数 (相補誤差関数) で fitting を行い、アナログ信号の波高と noise の大きさを見積もる。

入力信号が一定の場合、増幅段後のアナログ信号の波高は noise の影響でガウス分布でばらつく。したがって、ある threshold 電圧での ASIC の出力頻度は threshold 電圧以上の範囲でこのガウス分布を積分したものに等しい。この事から Threshold scan の結果は相補誤差関数¹ となり、相補誤差関数のパラメータが信号の peak の位置 (mean 値)、noise (標準偏差) となる。図 4.12 の真ん中の図は一定の信号を入力した際の threshold scan の結果の例を示しており、左と右の図はその分布から予想されるアナログ信号とその波高 (ベースライン) の分布を示している。アナログ信号の波高は図の Mean(p) と Mean(z) の差となり、noise は sigma(p) で表される。なお、HAPD に光を入射した場合は、入射光子数がポワソン分布で揺らぐ為、1 光電子信号、2 光電子信号での分布が階段状に積み上がったような分布となる。

¹相補誤差関数： $\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt$ fitting の際には右側に $\frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{V_{th}-\mu}{\sqrt{2}\sigma}\right)$ 、左側に $\frac{1}{2} \text{erfc}\left(-\frac{V_{th}-\mu}{\sqrt{2}\sigma}\right)$ を用いる (μ 、 σ はガウス分布の平均と標準偏差)。

第4章 144 channel HAPD 読み出し ASIC

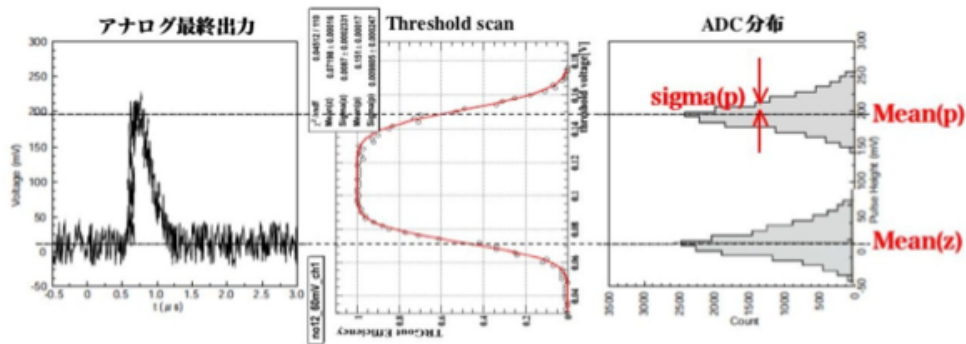


図 4.12: Threshold scan の図。(左)threshold scan 結果から予想されるアナログ信号の波形。(中)threshold scan 結果。(右)threshold scan 結果から予想される波高分布。

実際の測定では1~2光電子相当の光をHAPDに照射して行なった。図4.13はその際のASICのアナログ出力をオシロスコープに出力した際の図である。この図を見ても1光電子信号と2光電子信号がきれいに分離できている事が分かる。この際のThreshold Scanの結果が図4.14となっており、オシロスコープの図でも見られた通り、1光電子と2光電子(と3光電子以上)の信号がはっきりと分離された結果となっている。この結果の左側をガウス関数と相補誤差関数を合わせたもので、右側を3つの相補誤差関数の和の関数で右側をfitし、noiseと1光電子・2光電子の波高を求めたところ、noiseは22mV、1光電子は372mV、2光電子信号は752mVなった。この測定での増幅器の増幅率は約71 mV/fCであるので、noiseを電子数に換算すると約1940e⁻、1光電子信号は32,700e⁻となり、HAPDの増幅率32000と矛盾のない結果となった。また、2光電子信号も1光電子信号の2倍の波高となっており、正しく読み出せている事が分かった。この測定でのS/N比は約17と非常に高い値で読み出せている。

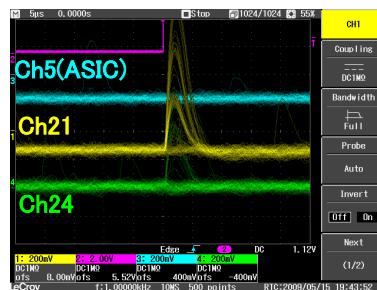


図 4.13: 1~2光電子の光を照射した際のアナログ信号。ch21(黄)でthreshold scanを行なった。

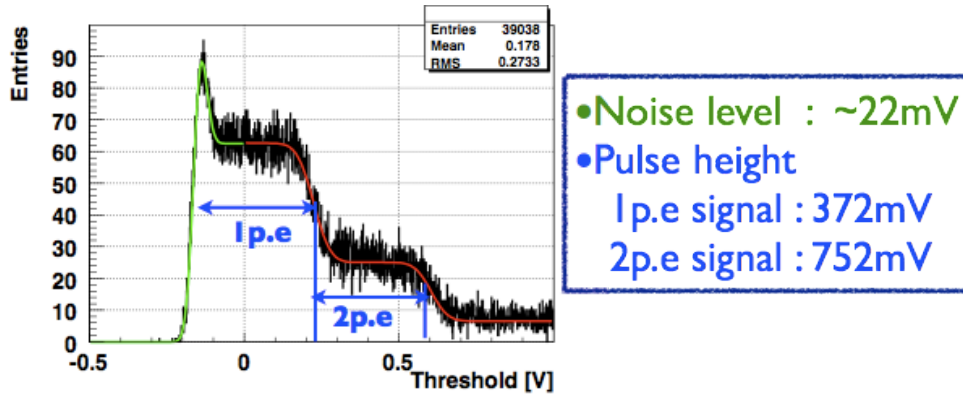


図 4.14: SA01 と FPGA での HAPD 信号を読み出し時の threshold scan 結果 (各 Threshold 電圧に対し 100 回、光を照射している)。ガウス関数と相補誤差関数を合わせた関数で分布の左側 (緑) を、3つの相補誤差関数で右側 (赤) を fit している。

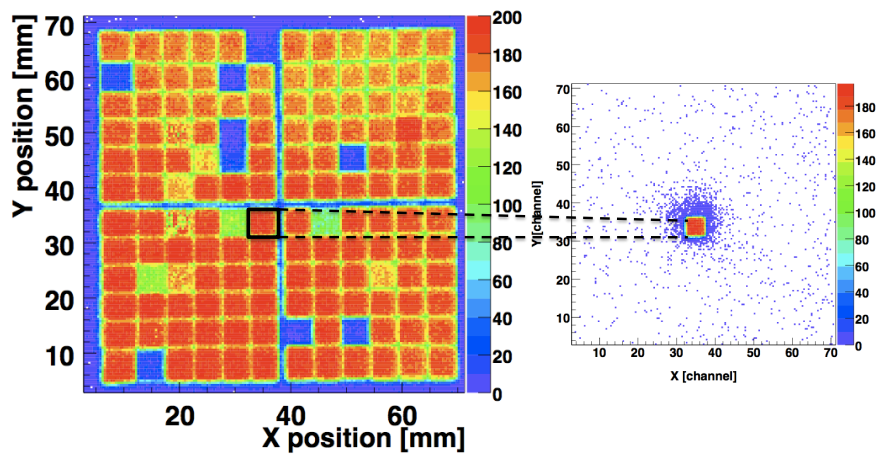


図 4.15: SA01 の 2-dimensional Scan 結果。(左) 全チャンネルを合わせた hit 分布。(右) 1チャンネルのみの hit 分布 (左の図の四角で囲まれたチャンネル光の照射位置を変えた際の hit 分布)。

2-dimensional Scan

この測定では、光の照射位置 (1つの位置につき 200 回照射) を変更して ASIC からの hit 出力頻度を測定する。この際のコンパレータに入力する threshold 電圧は約 0.6 光電子相当になるように設定されている。これによって、全チャンネルが正し

第4章 144 channel HAPD 読み出し ASIC

く読み出せているか確認し、FPGA でのデータ処理回路が正しく動作しているかを確認する。

図 4.15 はこの 2-dimensional Scan の結果を表しており、横軸・縦軸が光を入射した位置の x, y 座標、色はその位置での ASIC の出力数を表している。左の図はその時の全てのチャンネルでの hit 分布 (ただし、複数のチャンネルから出力があった場合でも hit 数は 1 としている)、右の図は 1 つのチャンネルのみの hit 分布を表している。これらの分布は HAPD の光の有感領域で高い hit 数をカウントしており、APD の pad と pad 間の不感領域がはっきりと見える分布が得られている。この事から、読み出しに問題が無い事が確認できた。なお、APD チップの内部で hit 数が少なくなっている (青や緑) チャンネルは HAPD または ASIC が dead チャンネルである為であり、HAPD の端のチャンネルのパッドが広がっているように見えるのは HAPD の内の端では電場が歪む為である。

また、図 4.16 は光の照射位置を固定し、1000 回光を照射した時の全チャンネルの hit 数を表している (ただし、APD チップ 1 つのみの分布である)。この図から光を照射した APD チャンネルからのみ hit が出力され、他のチャンネルは出力していない (クロストークも少ない) 事が確認できた。

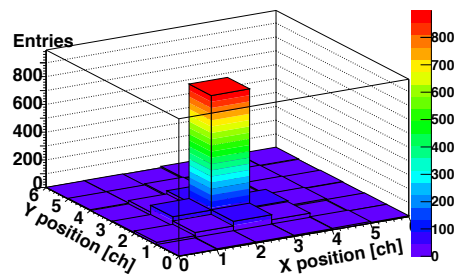


図 4.16: 1 チャンネルに LED 光を照射した場合の hit 分布。

4.3 SA02

前節 4.2 節で述べたように SA01 は 144 チャンネル HAPD の読み出し回路として、問題無く動作している事が確認できた。この事を受けて更にチャンネル数を増やした SA02 の開発を行なった。以下に、SA02 の開発・評価について記述する。

4.3.1 SA01 からの変更点

SA02 の SA01 からの変更点は、

- チャンネル数が 36 に増加
- 増幅器の増幅率を SA01 の 1/4 に。
- ゼロクロスコンパレータの threshold 電圧を調整可能とした。
- 前置増幅器内部の位相補償用の MOS キャパシタンスの容量を増加。

である。1つ目の変更によって、144 チャンネル HAPD の読み出しは 4 つの ASIC で可能となり、ASIC1 チップで、APD1 チップ全てのチャンネルを読み出せるようになった。2つ目に関しては、SA01 で見つかった 1 光電子相当信号入力でも増幅器が saturate してしまう問題を改善する為に行なった。具体的には前置増幅器の帰還容量を 2 倍にし、Pole-Zero 補償回路の結合容量を 1/2 に変更している。3つ目は、SA01 では GND に接続されていたゼロクロスコンパレータの threshold 電圧をリーディングコンパレータと同様に外部から入力できるように変更した。4つ目に関しては次節 4.3.2 節で述べる。

図 4.17 に SA02 の増幅器回路を SA01 からの変更点 (上述の変更点の 2 番目と 4 番目) と共に示す。

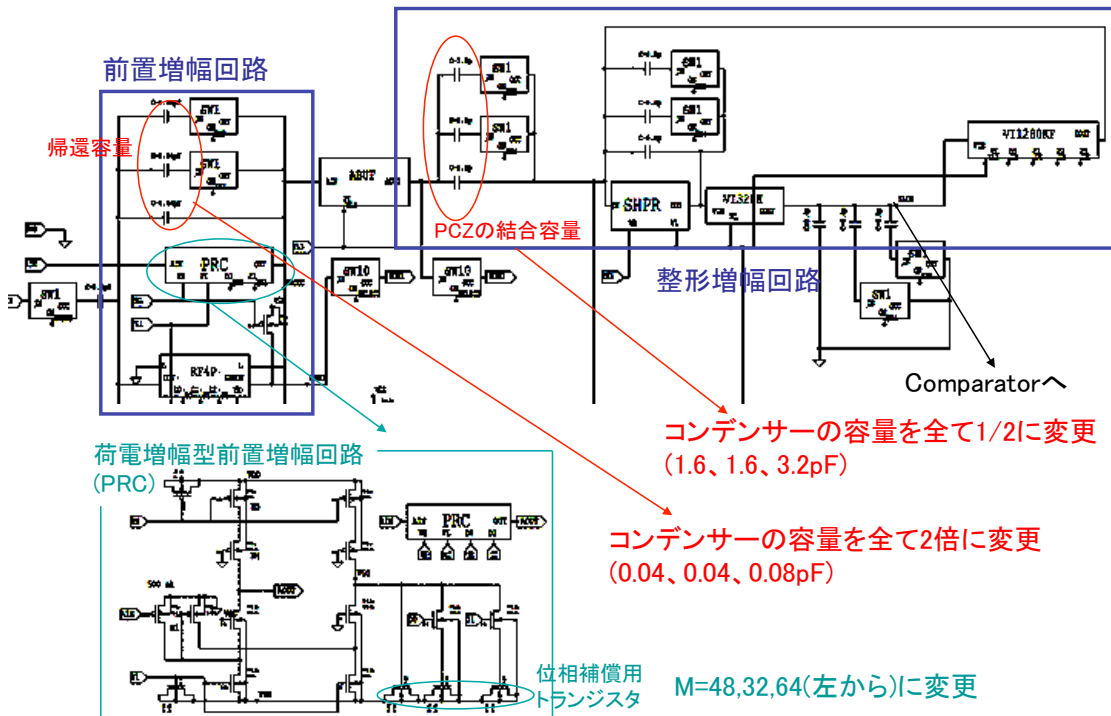


図 4.17: SA02 の増幅器部分の SA01 からの変更点。

4.3.2 Spice による検証

SA02 を試作する前に回路が想定した性能であるかどうか Spice シミュレーションで検証を行なった。シミュレーションは Tanner 社の T-spice で行なった。

位相補償回路シミュレーション

図 4.18 の右の図は SA01 の回路を増幅率のみを変えた場合のアナログ出力のシミュレーション結果である。この図の青い線は前置増幅器の出力を示しており、前置増幅器内に設けられた位相補償回路の設定を変更させたものである。なお、増幅率・整形時定数は最小の設定にし、入力容量は 144 チャンネル HAPD の検出器容量の 80pF としている。図でも示していると通り、位相補償回路を off にしている時には前置増幅器出力が発振してしまっており、アナログ最終出力 (図の赤線) はその影響を受けて波形が歪んでしまっている。この回路構成でも位相補償回路を on にすれば、発振を抑えられているが、位相補償回路を強化する事とした。このため、前述の変更点の通り位相補償回路中の MOS キャパシタンスの容量を増やした (トランジスタの個数を増加)(図 4.17)。この変更後のシミュレーション結果が図 4.18 の左の図である。図のように位相補償回路を off にした場合には前置増幅器出力では多少発振しているが、アナログ最終出力は問題にならない程度の影響に抑えられている。

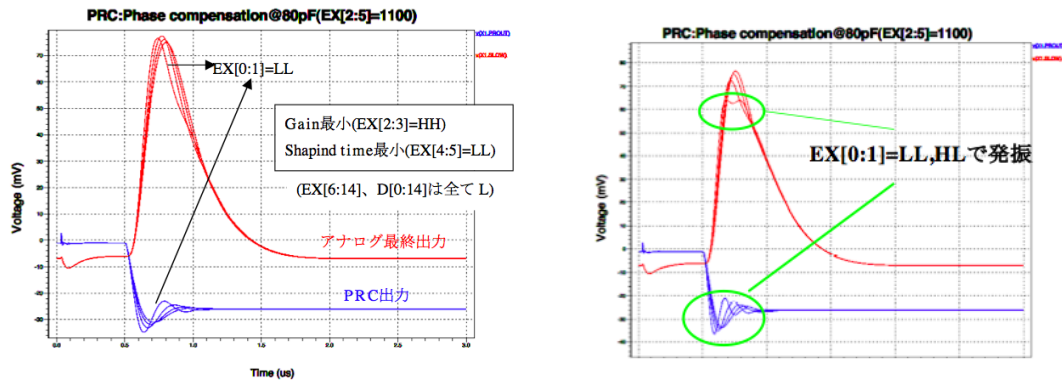


図 4.18: SA02 の位相補償回路の simulation 結果 (増幅率を最小にし、整形時定数も最小にした場合)。(左) 位相補償を強化した場合。(右) 位相補償を強化する前。

増幅率と noise のシミュレーション

SA02 で変更した増幅率が想定した通り 1/4 になっているかの確認と、noise level のシミュレーションも実際にチップを試作する前に行なった。

その結果が図 4.19 であり、(a) が入力信号に対する出力信号の波高 (増幅率の線形性) を (b) が noise の検出器容量依存性を SA01 の結果と共に表している。増幅率の図より、増幅器回路の増幅率は約 20、26、38、および 71 mV/fC となっており、想定した通り SA01 の 1/4 になっている事が確認できる。また、1 光電子相当信号に対して十分なダイナミックレンジを確保できている。noise は HAPD の検出器容量 80pF において約 1000~1100e⁻ となっており、SA01 の結果 (シミュレーション) と比較すると多少大きい値となっているがほとんど等しい noise level になっていると言える。なお、SA01 の実際の noise はシミュレーションより大きくなっているが、その事を想定しても SA02 の noise は 80pF で 1200e⁻ 程度になると思われ、目標 noise level を達成していると想定される。

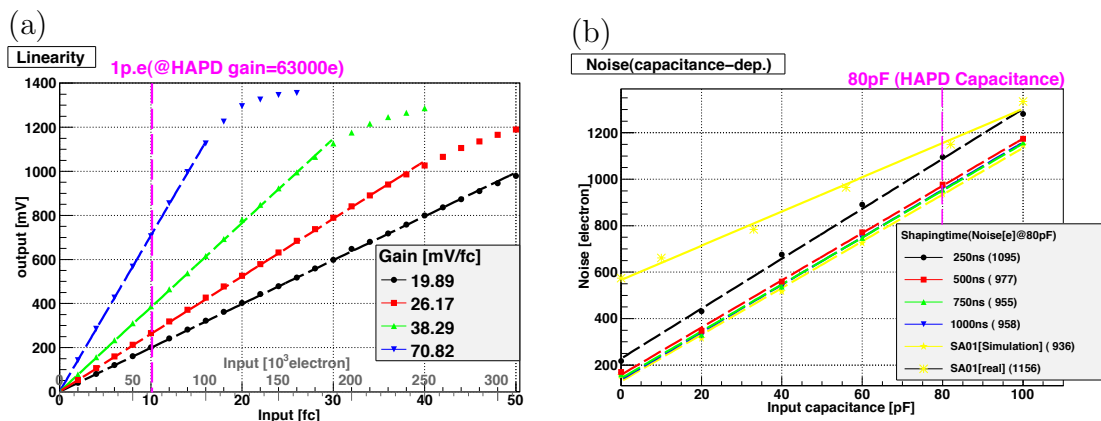


図 4.19: SA02 の性能 (simulation)。(a) 各増幅率設定 (4 段階) における増幅回路の線形性。(b) 各整形時定数 (4 段階) における noise の入力容量依存性 (SA01 は時定数最大の設定)。

4.3.3 動作検証

前述した通り、設計段階のシミュレーションで問題が無い事が確認できたので実際にチップ・テストボード (4.20) を作成し、動作検証を行なった。SA02 はパッケージを小型のものにする事を計画しているが、この動作検証では SA01 と同様のパッケージ (ピン数は増えているが) を用いた。また、テストボードは SA01 と FPGA を搭載したボード (図 4.9) と同じ回路構成になっている (SA02 はチャンネル数が 3 倍なのでボードに搭載するチップは 1 つである)。ただし、SA02 のボードは ASIC をボードに直付けではなく、ソケットを用いてチップを交換可能にしている。

第4章 144 channel HAPD 読み出し ASIC

動作検証のセットアップも SA01 の場合 (図 4.11) と同様であるが、HAPD に接続しての測定以外では光を照射せずテストパルスを ASIC に入力して行なった。以下に動作検証結果を示す。

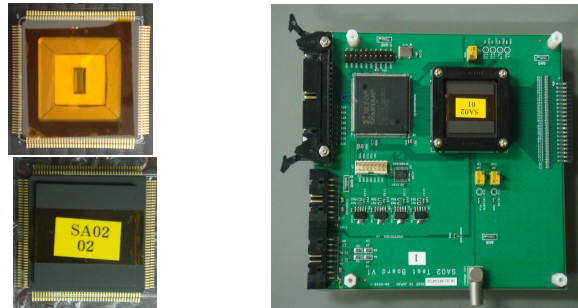


図 4.20: SA02 とそのテストボード。

増幅回路の増幅率とその線形性

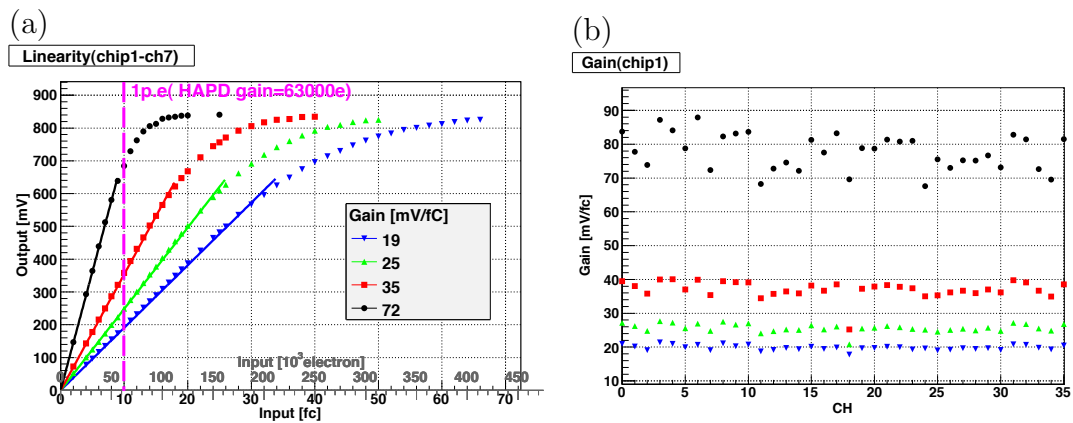


図 4.21: (a) 各増幅率設定 (4段階) におけるアンプの線形性 (18 チャンネルは dead チャンネル)。 (b) チャンネルによる増幅率のばらつき ((a) と同様に増幅率設定毎に色を変えている)。

シミュレーションでも確認した増幅回路の増幅率とその線形性を実際の ASIC で測定した。この測定では ASIC のテストパルス入力ピンからテストパルスを入力し、入力信号の大きさを変えながら前述した Threshold scan を行いアナログ信号の波高を測定した。その結果が図 4.21 で示す。図の (a) は 36 チャンネル中 1 チャンネルを取り出してきた結果であり、横軸に入力信号の大きさ、縦軸にアナログ信号の波高をプロットしている。この結果から増幅率は約 19、25、35、および 72 mV/fC と求まり、設計通りの性能を持っている事が確認できた。また、シミュレー

ションよりは低い信号で saturate しているが、HAPD の 1 光電子相当信号に対して十分なダイナミックレンジを得られており、SA01 で問題であった 1 光電子相当信号で saturate する点が改善されている。図 4.21 の (b) は、チップ内の全 36 チャンネルの増幅率を示している (横軸:チャンネル番号、縦軸:増幅率)。チャンネル間で多少のばらつきが見られるが dead チャンネル (ch18) 以外では想定した通りの増幅率となっている。

Noise

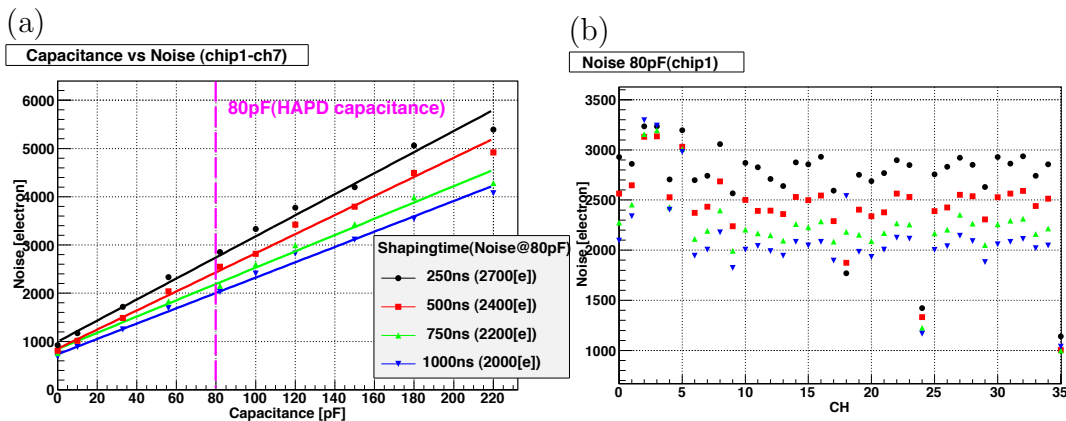


図 4.22: (a) 各整形時定数 (4 段階) における noise の入力容量依存性。 (b) チャンネルによる noise のばらつき (入力容量 80pF、(a) と同様に整形時定数設定毎に色を変えている)。

Noise の測定では入力部分に容量を接続し、信号を何も入力しないで Threshold Scan を行なった。Threshold Scan で得られた hit 分布の標準偏差を noise の大きさとしている。その結果が図 4.22 であり、(a) が Ch7 の noise の入力容量依存性を示し、(b) は HAPD の入力容量 80pF での全チャンネルの noise を示している。その結果、80pF での noise は 2000~3000e⁻ となっている。これは SA01 の測定値、SA02 のシミュレーション結果よりも 2~3 倍以上となっており、設計よりもかなり悪い値となっており、この原因は SA02 のボードではソケットを用いており、その部分から外来 noise の影響を受け易くなっている為だと思われる (SA01 でもソケットを用いたテストボードでのテストでは直付け時より noise が大きかった為)。実際に Aerogel RICH 検出器で用いる時はボードに直付けする事を考えており、noise はこの測定よりも小さくなると思われる。また、外来 noise の影響を受けにくく、現在よりもサイズが小さいパッケージに変更する事も行なっており、それによってシミュレーションで想定した 1200e⁻ 程度に noise を抑えられ

第4章 144 channel HAPD 読み出し ASIC

ると考えている。なお、この測定での noise であっても HAPD の増幅率を 60,000 とした場合、S/N 比は 20~30 と高い値となっており、実用上は問題が無い。

Offset 調節

SA02 の offset 調節回路は SA01 と同様のものである為、大きな変化は無いと思われるが、全チャンネルに正確な threshold 電圧の設定を行なう為には重要な要素である事と、他の回路の変更により影響を受けている可能性がある事より、SA02 でも offset 調節に関しての測定を行なった。

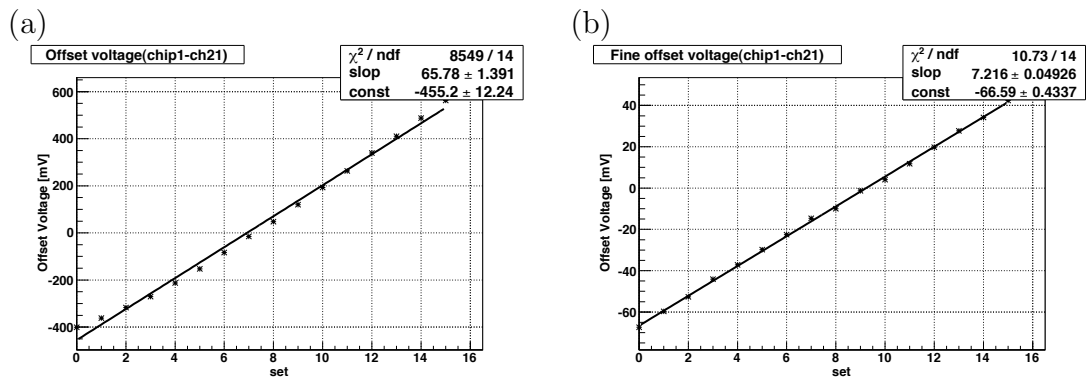


図 4.23: (a) 粗調節 (16bit) 設定を変化させた際の offset。(b) 微調節 (16bit) 設定を変化させた際の offset。

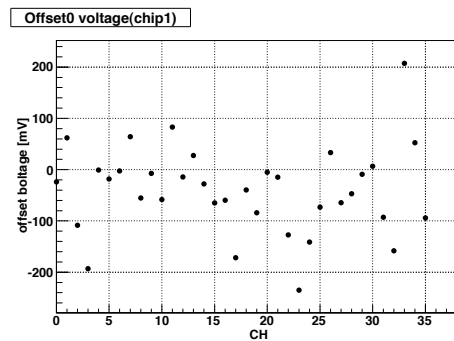


図 4.24: 全チャンネルで同一の設定時における SA02 の各チャンネルでの offset 位置のばらつき。

図 4.23 は offset 設定の値を横軸、縦軸に Threshold Scan から求めたアナログ信号のベースラインの位置をプロットしており、(a) が粗調節、(b) が微調節である。この結果の通り、粗調節は約 66mV 毎に微調節は約 7mV 毎に設定できる。また、offset 調節は 16 段階で設定できる為、粗調節は $\pm 500\text{mV}$ 、微調節は $\pm 56\text{mV}$

の範囲で設定できる。したがって、SA02 では微調節・粗調節両方によって約7mV 毎に offset 調節が可能となっている。

図 4.24 に全チャンネルで同一の設定とした場合のアナログ信号のベースラインの位置のチャンネル間のばらつきを示す。この結果を見る $\pm 220\text{mV}$ 程度のばらつきが見られるが offset 調節は前述した通り $\pm 500\text{mV}$ の範囲で調整できるので offset 調節で調整可能な程度のばらつきとなっている。

HAPD 信号の読み出し

実際に HAPD にテストボードを接続して SA02 での読み出し試験を行なった。この測定では SA01 での HAPD 信号読み出し試験のセットアップ (図 4.11) で行い、LED で光を照射して行なった。ただし、SA02 では 1 光電子相当信号で saturate しなくなったので HAPD の増幅率は SA01 の測定よりも高くし、70,000 程度で測定している。図 4.25 が Threshold Scan の結果となっており、SA01 の時より Noisy になっているが、1 光電子と 2 光電子の領域が判別できる分布となっている。この分布を fitting の結果、noise は約 27mV、1 光電子相当信号の波高は約 230mV、2 光電子相当信号の波高は約 460mV となっており、これを増幅器回路の増幅率 20 mV/fC(ch19 の増幅率最小の設定) を用いて電子数に換算すると noise は約 $8400e^-$ 、1 光電子相当信号は約 $71,800e^-$ となる。従ってこの測定での S/N 比は約 8.5 となっており、SA01 よりも 1/2 程度低い値となっている。これは noise 測定で述べた通り、外来 noise が原因だと考えられる。ただし、Aerogel RICH 検出器でのコンパレータに入力する threshold 電圧の値は noise level の 4σ と考えているので、この noise level でも読み出しとして使用する上では問題無い性能である。

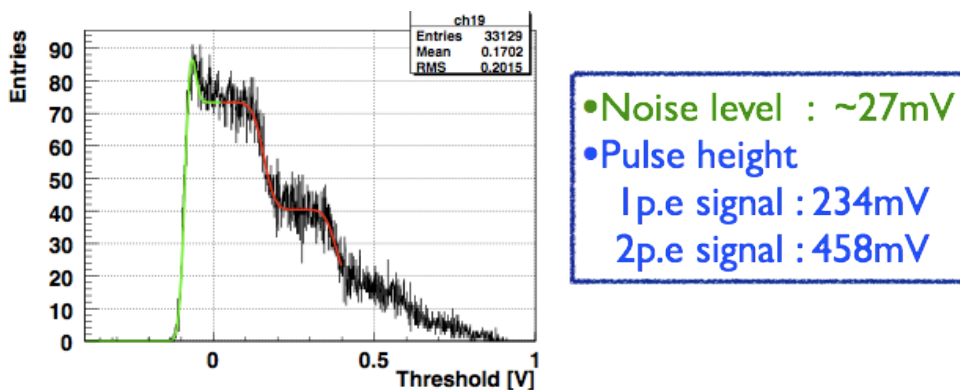


図 4.25: SA02 の Threshold scan 結果。ガウス関数と相補誤差関数の和の関数で左側 (緑) を、2つの相補誤差関数の和の関数で右側 (赤) を fit している。

第4章 144 channel HAPD 読み出し ASIC

表 4.3 に本研究で用いたパッケージでの SA02 の仕様と動作検証結果を示す。なお、この表では SA01(表 4.2) から変化した点のみを示している。

表 4.3: SA02 の仕様と動作検証結果。

	仕様と動作検証結果
パッド数	128
パッケージ	160p QFP
チャンネル数	36
チップサイズ	6.5×3.0mm ²
雑音レベル	2000~3000e ⁻ @80pF
プリアンプ増幅率	約 20, 25, 35, 72 mV/fC

4.3.4 小型のパッケージへの改良

これまでの評価において SA-series は Aerogel RICH の読み出し用 ASIC として十分な性能を有している事が分かった。これにより、回路構成に関してはほぼ完成したと言える。しかし、Belle II 実験で実際に使用する為には現在の読み出し用テストボードよりサイズの小さいボードが必要である。この為、SA02 のパッケージを LTCC(Low temperature co-fired ceramics) に変更し、読み出し回路の小型化を計画している。また、このパッケージでは現在ボード上に配置しているコンデンサー等もパッケージ内に配置する事が可能である為、noise の減少が見込まれる。なお、現在の SA02 のパッケージのサイズは約 4 × 4 cm² であるが、新パッケージでは ASIC チップ外部の回路を組み込んでもサイズは約 1.3 × 1.3 cm² である。現在、この新しいパッケージにした SA02 の試作しており、試作・動作検証終了後に小型の読み出しボードの開発を予定している。

第5章 ビームテストによるプロトタイプ Aerogel RICH 検出器性能評価

この章では、現在開発されている Aerogel、144 チャンネル HAPD、読み出し回路によって構成される Aerogel RICH 検出器の性能を評価する為に行なった電子ビーム (2GeV/c) を用いた電子ビーム照射試験について記述する。このビームテストは 2008 年 3 月と 6 月と 2009 年 11 月の計 3 回行なっているが本論文では 2009 年 11 月のビームテストの結果を主題として記述し、2008 年のビームテストについては結果のみを簡潔に記述する。(詳細は参考文献 [26, 27] を参照)。

5.1 ビームテストの Set-up

この節ではビームテストを行なった Fuji test beam line、プロトタイプ Aerogel RICH 検出器のセットアップについて記述する。

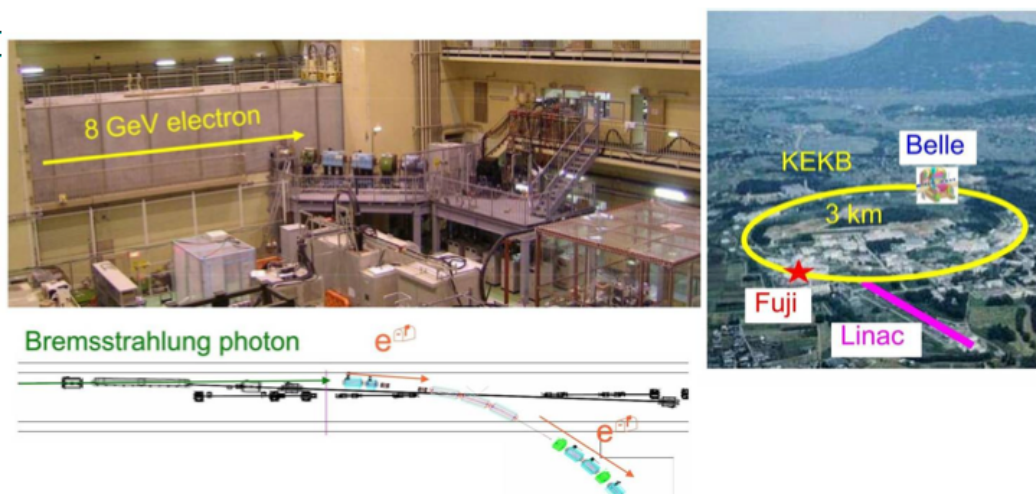


図 5.1: Fuji test beamline。

第5章 ビームテストによるプロトタイプ Aerogel RICH 検出器性能評価

5.1.1 Fuji test beamline

ビームテストは高エネルギー加速器研究機構内の Fuji test beamline(図 5.1)で行なった。Fuji test beamline では、KEKB 加速器で周回している電子ビームと残留ガスとの相互作用による制動放射で発生するガンマ線をタングステン標的にぶつける事によって、2GeV/cの電子ビームを取り出せるようになっている。ビームテストではこの2GeV/cの電子ビームをプロトタイプ Aerogel RICH 検出器に照射して行なった。

5.1.2 プロトタイプ Aerogel RICH 検出器

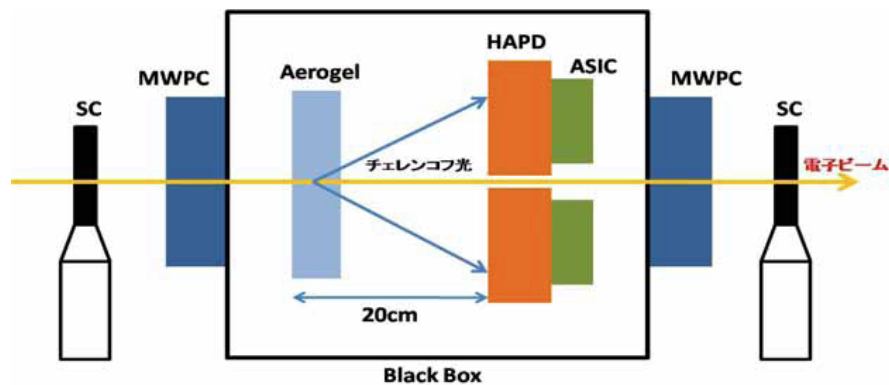


図 5.2: プロトタイプ A-RICH 検出器 Set-up。

ビームテストでは実際に Belle II 測定器にインストールされた際の Aerogel RICH 検出器の性能を評価する為に、プロトタイプ Aerogel RICH 検出器を作り、測定を行なった。そのセットアップはインストール時のセットアップを想定した図 5.2 のように構成される。Aerogel RICH 検出器は暗箱内に配置されており、6 台の HAPD とその信号を読み出す為の ASIC のテストボード 24 枚、輻射体の Aerogel で構成されている。HAPD は縦に 2 台、横 3 台で並べられており、Aerogel は HAPD の光電面から 20cm の位置に配置される。ビームが HAPD の配置のほぼ中心を通るようにプロトタイプ Aerogel RICH 検出器は配置されている。また、ビームテストでは暗箱の前後にトリガー信号用のシンチレーション検出器 (SC) とビーム入射位置特定用の MWPC (Multi Wire Proportional Chamber) が配置されている。

以下に各構成要素のセットアップの詳細を記述する。

Aerogel(Focusing 配置)

Aerogelを厚くすればチェレンコフ光の光量は増加するが、単一の屈折率の aerogel を厚くしただけでは図 5.3 の左図のように Aerogel の表面と表面から発生したチェレンコフ光の光検出器での検出位置が広がってしまう為、再構成したリングのチェレンコフ放射角の分解能が悪くなり K/π 識別能力は低下してしまう。そのため、図 5.3 の右図の用に検出器に近づくにつれて屈折率が大きくなるように屈折率の異なる Aerogel を層にするという方法が考えられた (Focusing 配置)。ビームテストでは Aerogel の屈折率や枚数等を変更して測定した。

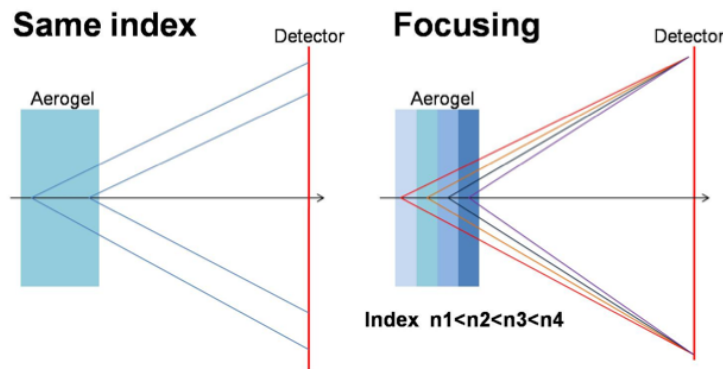


図 5.3: Aerogel の配置によるチェレンコフ光の光検出器での検出位置の違い。(左) 定屈折率での配置。(右)Focusing 配置。

HAPD の配置

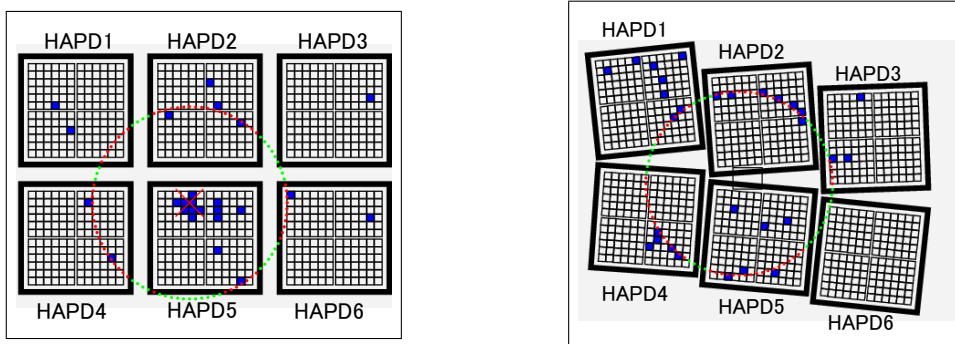


図 5.4: プロトタイプ Aerogel RICH 検出器の HAPD の配置 (ビーム入射側から見た図)。(左) 整列配置、(右) 扇型配置。

第5章 ビームテストによるプロトタイプ Aerogel RICH 検出器性能評価

前述したように、プロトタイプ Aerogel RICH 検出器は6台の144チャンネルHAPDを用いる。ビームテストでは整列配置と扇型配置の2つの配置で試験を行った。整列配置は図5.4の左図のようにHAPDを縦2台、横3台で整列に配置している。また、HAPDの間隙は約13mmとなっている。扇型配置は Belle II 測定器にインストールされた際のHAPDの配置の一部を再現している。インストール時には図5.5のようにHAPDを Endcap 部に同心円状に配置する。この同心円状の配置のHAPD6台分を取り出した配置が扇型配置であり、図5.4の右図のようにHAPDを配置する。

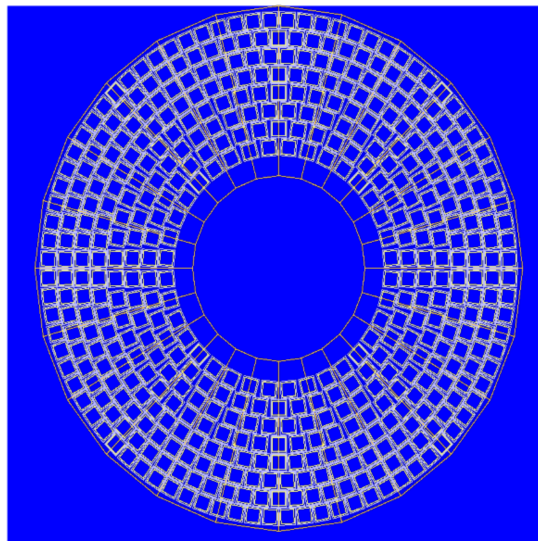


図 5.5: Belle II 測定器での光検出器の配置の概念図。

読み出しシステムの構成と Threshold 電圧設定

2009年のビームテストではHAPD信号を読み出すASICとしてS04とSA01の2種類を用い、下段3段のHAPD(HAPD4～HAPD6)をS04、上段3段のHAPD(HAPD1～HAPD3)をSA01で読み出した。S04はチャンネル数が18、SA01は12である為、ビームテストではS04を24枚、SA01を36枚用いた。どちらのASICでも、HAPD36チャンネル(1APDチップに相当)を読み出せるようなボード(daughter board、SA01は図4.9で示したFPGAを搭載したボード)を用い、HAPD1台につき4枚のdaughter boardをHAPD背面に取り付けられたmother boardに接続する。以下にS04とSA01それぞれのデータ読み出し方法について述べる。

5.1. ビームテストの Set-up

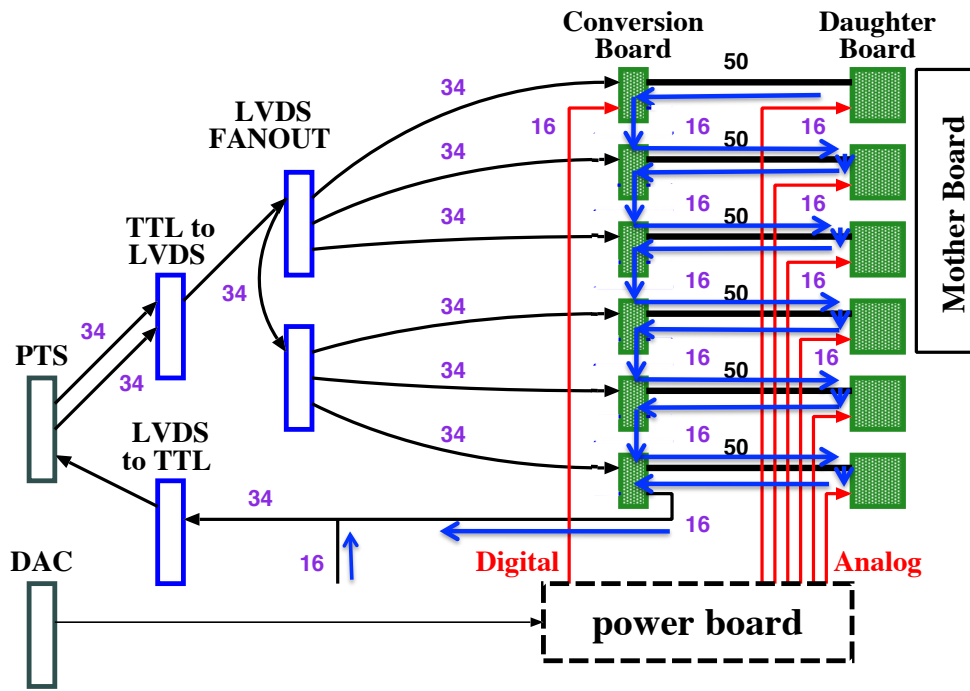


図 5.6: S-series でのデータ読み出し。

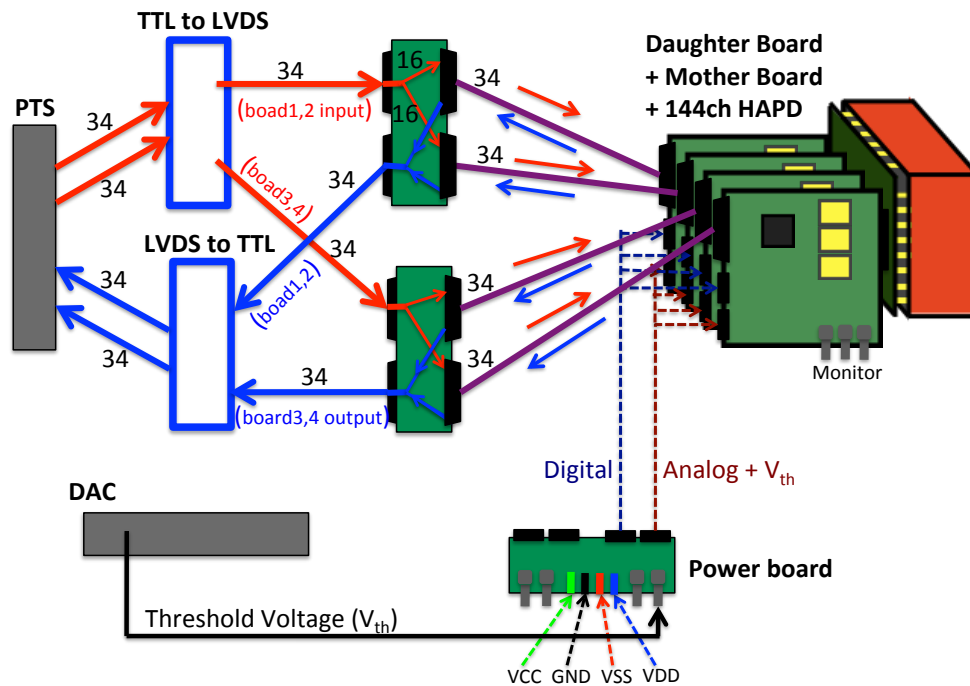


図 5.7: SA01 でのデータ読み出し。

第5章 ビームテストによるプロトタイプ Aerogel RICH 検出器性能評価

S04

S04は図5.6のようにHAPDからのデジタルデータを読み出す。まず、VMEモジュール(PTS)からデータを読み出す為のクロック信号が各ASICに送られる(図中の黒矢印)。このクロック信号によって各ASIC内のシフトレジスタに保持されていたデジタルデータが次々に押し出されてシリアルに読み出され、VMEモジュールに送られていく(図中の青矢印)。ビームテストでは6枚のdaughter boardを1組として信号読み出しを行なっている(6枚のS04内のシフトレジスタが連結され、1つのシフトレジスタを形成されている)。

SA01

SA01はS04と異なり、各daughter board毎にデジタルデータを読み出す(図5.7)。まず、VMEモジュールからトリガー信号を各daughter boardに送り(図中の赤の実矢印)、このトリガー信号を受けた時にFPGA内に蓄えられていたデジタルデータをVMEモジュールに送り出す。

Threshold 電圧の設定

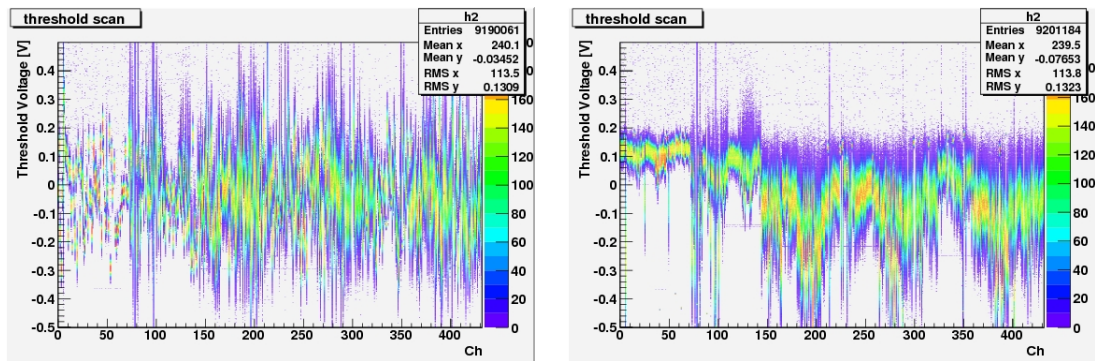


図 5.8: Offset 調節前後での Threshold scan 結果 (SA01 の結果のみ表示)。(左)Offset 調節前。(右)Noise 分布の 4σ が 200mV になるように Offset 調節したもの。この図で最初の 144 チャンネルが noise が低いのはその HAPD の漏れ電流が他の 2 台の HAPD よりも少なかった為である²。

前章4章で述べた通り、144チャンネルHAPDのコンパレータに入力する threshold 電圧はチップ毎に設定される為(ビームテストでは全チップに同一の threshold 電圧を設定した)、全チャンネルに対して正しい threshold 電圧の設定をするには offset 調節を行なう。そのためにビーム照射前に、Threshold scan を行ない、全チャンネルの noise 分布を測定し、この noise 分布を各チャンネル毎にガウス関数で fit

²この HAPD のみ high QE 対策品。後述の表 5.5 でもその傾向が見られる。

5.2. データ解析方法

してその標準偏差を求める。この標準偏差の値によって offset を調節する。ビームテストでの標準設定では、noise 分布の 4σ 分の位置に threshold 電圧 (200mV) が相当するように offset 調節を行なった (以下のビームテスト結果も特別な記述がなければこの設定である)。

図 5.8 は offset 調節前後での Threshold scan の結果を示している。この図の横軸はチャンネル番号、縦軸が threshold 電圧であり、色がその threshold 電圧、チャンネルでの ASIC からの出力頻度を表している。Offset 調節前 (左図) ではビームテストでの threshold 電圧 200mV 以上でも高い出力頻度を示しているチャンネルがあるが、offset 調節後 (右図) ではそのようなチャンネルは無くなり、全てのチャンネルで正しく設定できている事が分かる。

なお、1 光電子相当信号も noise の影響を受ける為、noise と同様の分布で波高が揺らぐと考えられる。そのため、noise を十分にカットし 1 光電子相当信号のほぼ全てを検出する為には S/N 比が最低でも 7 ある事が望ましい。

トリガーカウンター

ビーム通過に同期した信号を作り、プロトタイプ Aerogel RICH 検出器のデータ取得のトリガーとする。トリガーカウンタは図 5.2 で示したように暗箱の前後に 2 つの plastic scintillation counter(SC) で構成される。この 2 つの検出器と MWPC からの信号の coincidence を取ったものがトリガー信号となる。

MWPC(Multi Wire Proportional Chamber)

MWPC は、電子ビームの入射位置の特定の為に用いているワイヤーチェンバーである。ワイヤーチェンバーの基本的な構造は陰極と陽極の電極間に高電圧を印加されており、その間にガスが封入されているものである。MWPC は互いに垂直に縦方向と横方向にワイヤーが張られ、2次元で飛跡を測定することができる。この MWPC を暗箱の両側に取り付ける事により、電子ビームの暗箱内の飛跡を知ることができる。この情報と HAPD の hit 情報からチェレンコフ放射角を導出する。

5.2 データ解析方法

Aerogel RICH 検出器で重要となる事は K/π 粒子識別能力である。この節では K/π 粒子識別能力の評価に必要な検出光電子数 (N_{pe})、Background 数 (BG)、チェレンコフ光角度分解能を定義し、その導出方法を説明する。

第5章 ビームテストによるプロトタイプ Aerogel RICH 検出器性能評価

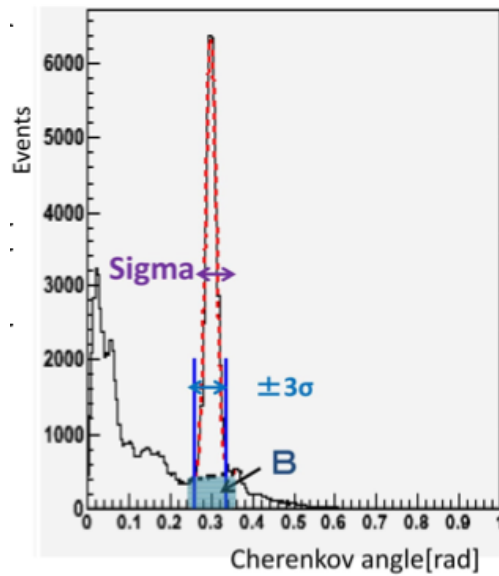


図 5.9: チェレンコフ角度分布での Npe、角度分布、BG の導出

ビームテストでは MWPC からの電子ビームの tracking 情報と HAPD の hit 位置からチェレンコフ光の角度分布を再構成する。図 5.9 は再構成された典型的な角度分布である。横軸が検出した HAPD のチャンネルの hit 位置から再構成された角度を、縦軸がそのイベント数である。ビームテストでは運動量 $2\text{GeV}/c$ の電子ビームを用いている為、式 2.1, 2.4 等からチェレンコフ放射角は約 0.3rad と考えられる。つまり、図 5.9 の 0.3rad 付近のピークがチェレンコフ光によるものと考えられる。なお、その他のピークは HAPD の入射窓で発生したチェレンコフ光等によるものである (詳細は参考文献 [26] を参照)。

検出光子数の導出の際には、まず、この角度分布のチェレンコフ光によるピークをガウス関数と 1 次関数を合わせた関数で fit する。1 次関数は、チェレンコフピーク周辺での Background が角度に比例していると考えられる為に用いている。ここから得られたチェレンコフピークの標準偏差 σ から $\pm 3\sigma$ の範囲の event 数を積分する事により、検出光電子数 (Npe) と Background 数 (BG) を導出する。この際に、fit した 1 次関数よりも上の部分を積分したものを Npe とし、下の部分を積分したものを BG と定義している。また、チェレンコフピークの標準偏差 σ は 1 光電子当たりの角度分解能 σ_{photon} として定義しており、ビーム 1track 当たりの角度分解能 σ_{track} は

$$\sigma_{\text{track}} = \frac{\sigma_{\text{photon}}}{\sqrt{N_{\text{pe}}/\text{track}}} \quad (5.1)$$

と定義する。

5.3 過去 (2008 年) のビームテスト

ビームテストは2008年の3月と6月にも行なわれており、144チャンネルHAPDと読み出しASICを用いたプロトタイプ Aerogel RICH 検出器の最初のビームテストである。図5.10の左図がその際に得られた全 track 合計でのリングイメージを示しており、ビームの通過位置を原点とした際のHAPDからhit出力があったチャンネルの位置をプロットしたものである (HAPDの光電面上での2次元座標でプロット)。この図からチェレンコフリングの観測に成功していると言える。また右図はこれらのビームテストで最高の性能を示したセットアップでのチェレンコフ角度分布を示している。この設定では Aerogel は屈折率 1.0462、1.0501、1.0560 で各 Aerogel の厚さが 10mm の 3 枚を Focusing 配置で用いている。また、HAPD の信号の読み出しには S-series の ASIC を用いた (主に S04 を用いて足りない分は S03、S04 を使用)。この設定で得られた Aerogel RICH の性能は、

- Npe/track : 5.8
- 角度分解能 : 5.3 mrad/track (12.7 mrad/1p.e)

である。4GeV/c の K 中間子、 π 中間子のチェレンコフ放射角の差は約 23[mrad] である為、この運動領域で 4.1σ の K/ π 粒子識別を有している結果となり、目標の 4σ での K/ π 粒子識別を達成した。しかし、実際に Belle II 実験にインストールした際は 1track 毎に粒子識別をする事を考えると 1track 当たりでの検出光電子数が 5.8 では少なく、改善が求められた。2009 年のビームテストでは検出光電子数を増やす為に Aerogel、HAPD の改良を行なった (改良点の詳細は次節で述べる)。

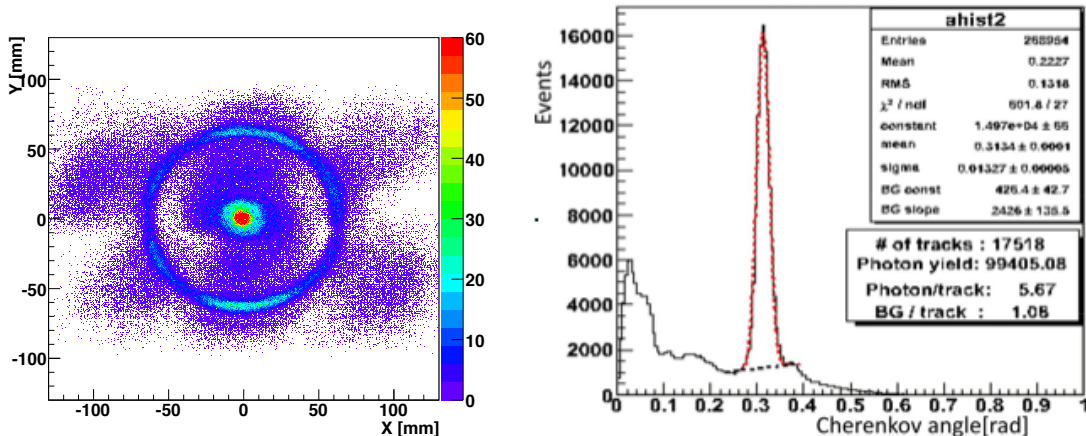


図 5.10: 2008 年ビームテストの結果。(左) リングイメージ (全 track の合計)、(右) 角度分布。

5.4 ビームテストの結果

この節ではまず、2008年のビームテストからの改良点・変更点を記述し、その後で2009年のビームテストの結果について記述する。ビームテストの結果としては、最初に threshold 電圧設定が適切であるか確認する為に行なった Threshold run について記述し、次にこのビームテストで最高の性能を達成した設定での結果から現在得られる Aerogel RICH 検出器の性能について記述する。そして最後に、読み出し ASIC として SA01 と S04 を使った場合での性能の比較、HAPD の改良による効果の検証を行なう。

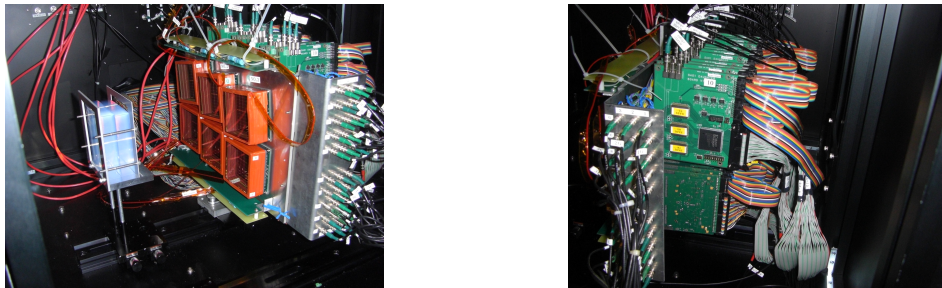


図 5.11: プロトタイプ Aerogel RICH 検出器 (2009 年のもの)。(左) ビーム入射方向から。(右) 背面。

5.4.1 2008 年からの改良点と変更点

2008 年の結果より検出光電子数を増やす事が必要である事が分かった。そのための対策として以下の 2 点が考えられ、HAPD と aerogel の改良が行なわれた。

- Aerogel の透過率の向上
- HAPD の量子効率の向上

1 つ目は aerogel の透過率を高くする事によって HAPD まで到達する光子数を増やす為であり、特に Focusing 配置で HAPD に最も近い位置に置かれる屈折率の高い aerogel の透過率を高くする事が求められた。2 つ目は HAPD に到達した光子を光検出器で検出光子数を増やす為である。2009 年ではこれらの対策を施した aerogel と HAPD を用いてビームテストを行なっている。

表 5.1 は 2008 年、2009 年のビームテストで最高性能を示した設定で用いた aerogel の 400 nm での屈折率と透過率を示している。この表から分かるように高透過率対策を施した aerogel(上段 2 つ) は 2008 年でも使用した aerogel(下段 3 つ) よりも高

5.4. ビームテストの結果

い透過率を示している。また、2008年では屈折率が高くなると透過率が減少しているが高透過率対策した Aerogel では高屈折率でも変わらない透過率が得られている。

表 5.1: ビームテストで用いた Aerogel。2009年、2008年で最高の性能を示した設定で使用した Aerogel のみ表示 (上段2つが2009年、下段が2008年)。

Aerogel No.	屈折率	透過長 [mm] (@400nm)	厚さ [mm]	
PDR20-3a	1.0536	47.8	20	高透過率対策品
PDR11-4a	1.0646	55.4	20	高透過率対策品
J07-A2	1.0462	46.9	10	
J07-B2	1.0501	41.4	10	
J07-C2	1.0560	35.4	10	

HAPD も量子効率 (QE) が30%を越す事を目標に改良を行なった。表5.2は2009年ビームテストで用いた HAPD を示しており、上段4つが High QE 対策品である。表からも分かる通り、QE が30%を超えるものを安定的に製作するにはまだ改良が必要であるが、30%を超える HAPD の作成に成功した。

表 5.2: ビームテストで用いた HAPD。下段3つは2008年ビームテストでも用いた。

HAPD No.	QE[%](@400nm)	
SHP113	21.1	High QE 対策品
SHP117	30.1	High QE 対策品
SHP118	27.4	High QE 対策品
SHP120	20.5	High QE 対策品
SHP087	15.0	
SHP077	22.3	
SHP070	25.0	

その他の2009年のビームテストの2008年からの変更点は読み出しの ASIC に SA01 を用いた事である。ただし、SA01 のチップ数が HAPD6 台分に足りない点と daughter board が大きい為、上段と下段の両方に取り付ける事がない点から、SA01 は上段3つの HAPD のみに使い、下段3つの HAPD は S04 で読み出した。

第5章 ビームテストによるプロトタイプ Aerogel RICH 検出器性能評価

なお、SA01 と S04 の増幅回路の増幅率はそれぞれ約 71、13 mV/fC に設定し、整形時定数は両者とも約 $1\mu\text{s}$ に設定して測定した。

5.4.2 Threshold run

実際のビームテストでの結果の前に ASIC に設定した threshold 電圧が適切であったかどうかを検証する。図 5.12 は threshold 電圧を変化させていった場合の Npe(黒) と BG(赤) を表している。この測定では noise の 4σ に 200mV になるように offset 調節してある。SA01 については、Threshold 電圧が 200~300mV の範囲では Npe、BG ともほとんど変化が見られず、それ以下では BG のみが増加しており、それ以上では Npe が減少している。対して、S04 は 150mV 以上で BG はほとんど変化していないが、Npe は減少し始めてしまっている。以上の結果より、threshold 電圧を 200mV とした設定は SA01 については適切であったが、S04 では Npe が 10%程度損している設定となってしまう。この原因は S04 の方が SA01 より S/N 比が低く、同一の threshold 電圧設定でも 1 光電子相当信号の一部がカットされてしまう為だと考えられる。また、SA01 は offset を約 5mV 毎に設定できるが、S04 は約 11mV でしか設定できない為、設定の精度も S04 の方が低い³。

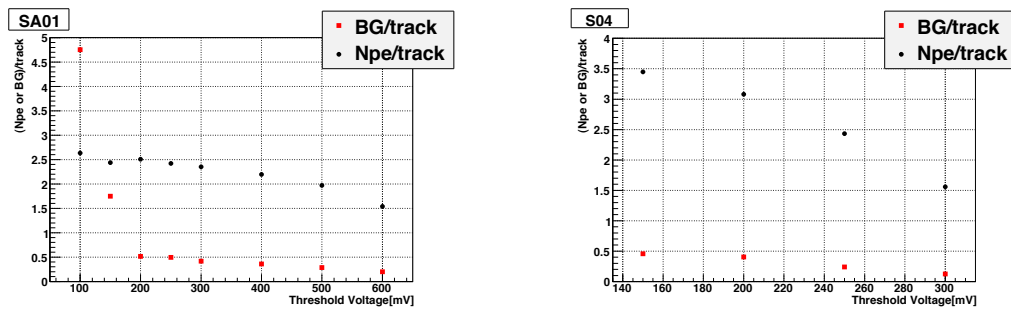


図 5.12: Threshold 電圧を変えた場合の Npe と BG。(左)SA01 で読み出している HAPD(HAPD1~3) のみで導出した結果。(右)S04 で読み出している HAPD(HAPD4~6) のみで導出した結果。

5.4.3 プロトタイプ Aerogel RICH の性能評価結果

ビームテストでは Aerogel の屈折率や組み合わせを変えて測定を行なった。この節ではその中で最も高い性能を示した設定のものについて述べ、達成された Aerogel

³入力電荷量に換算した場合、ビームテストの増幅率設定では SA01 は約 $550e^-$ 、S04 は約 $5,500e^-$ 毎に offset 調整している事となる

5.4. ビームテストの結果

RICH 検出器の性能について述べる。ビームテストで最も高い性能を示した設定では aerogel は表 5.1 の上段で示した 2 枚を Focusing 配置で用いた。また、HAPD は図 5.13 で示した配置で high QE 対策を施したものを 4 台、対策前のものを 2 台用い、扇型配置で測定した。

以下では、この設定での noise level について述べた後、検出光電子数、 K/π 粒子識別能力について述べる。

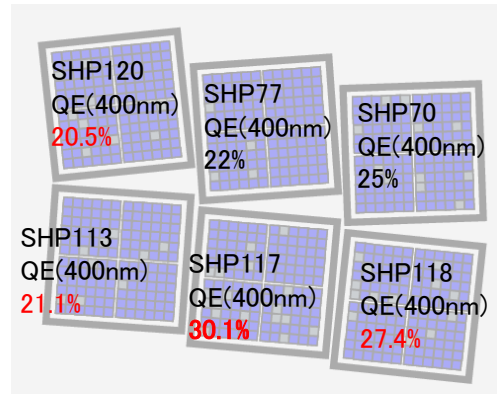


図 5.13: 扇型配置での HAPD の配置。QE の値が赤字となっている HAPD が high QE 対策品。上段 3 台を SA01、下段 3 台を S04 で読み出した。

Noise level

Noise level は offset 調節の際に行なった Threshold scan の結果から得られた noise 分布の標準偏差から求めた。その結果が表 5.3 である。この表は各 HAPD の APD チップ毎に平均を取った noise を HAPD の増幅率と共に示している。また、これら 2 つの値から S/N 比も導出している (S は浜松ホトニクスが測定した HAPD の信号の増幅率から導出)。表の左側が SA01 で読み出した HAPD で、右側が S04 で読み出した HAPD である。SHP120 の noise が他の HAPD の 1/2 以下の noise となっているが、全 HAPD の APD チップで 5,000~6,000e⁻ 程度の noise level で読み出せている。また、図 5.14 は全チャンネルでの S/N 比をビーム入射方向から見た平面でマップしたもので、色が S/N 比を表している。前述した通り、ビームテストでの設定では 1 光電子相当信号をほとんど全て読み出す為には 7 以上の S/N 比を必要であるが、ほとんどのチャンネルでこの値を達成している。ただし、この図での S/N 比は HAPD の増幅率を Signal として導出している為、1 光電子相当信号で saturate する SA01(第 4.2.1 節を参照) では実際よりも高い表示をしている可能性がある。しかし、この事を考慮しても読み出しに問題の無い S/N 比を達成していると思われる。

第5章 ビームテストによるプロトタイプ Aerogel RICH 検出器性能評価

表 5.3: HAPD の各 APD チップ毎の増幅率、Noise、S/N。左側が SA01 で読み出したもので右側が S04 で読み出したもの。

HAPD No.		増幅率	Noise[e ⁻]	S/N	HAPD No.		増幅率	Noise[e ⁻]	S/N
SHP120	A	52000	2116	28.6	SHP113	A	52000	5364	10.4
	B	36000	1700	22.9		B	52000	6720	9.5
	C	48000	2746	15.0		C	48000	4499	10.9
	D	50000	1883	26.8		D	36000	7819	5.2
SHP077	A	62500	4912	13.4	SHP117	A	56000	5923	10.3
	B	62500	6727	10.9		B	32500	5307	7.0
	C	50000	4223	13.5		C	42900	8029	5.5
	D	46800	5272	10.0		D	48000	5175	10.9
SHP070	A	60000	5849	10.6	SHP118	A	49000	4683	10.7
	B	56000	3629	16.6		B	42000	5898	9.0
	C	60000	6065	11.1		C	49000	5305	10.0
	D	60000	5616	10.9		D	49000	5167	11.1

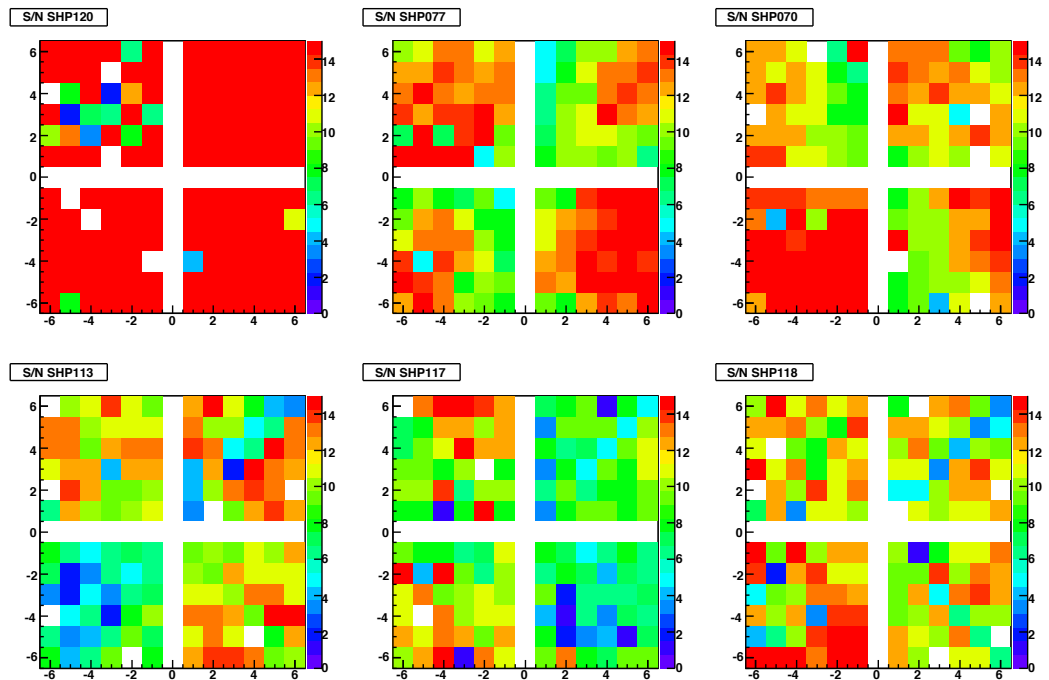


図 5.14: HAPD のチャンネル毎の S/N 比の map。ビーム入射方向から見た場合の配置となっており、色が S/N 比を表す。(白の部分は dead チャンネル)。

5.4. ビームテストの結果

検出光電子数と K/ π 粒子識別能力

図 5.15 がビームテストの結果である。左図が全 track での合計のリングイメージであり、SA01 でも正しくリングの観測に成功している事が確認できる。また、右図はチェレンコフ角度分布を表しており、この分布より求めた Aerogel RICH 検出器の性能を表 5.4 で示す。この結果より、1track 当たりの検出光電子数は 13.5 となり 2008 年の時より 2 倍以上改善されており、Aerogel と HAPD の改善の効果が現れた結果となっている。更に 4GeV/c での K/ π 識別も 5.9σ で可能となっており、2008 年よりも大幅に性能が向上している。なお、図 5.16 はこの設定で観測されたビーム 1track での HAPD の hit map である。この図のようにこの設定ではビーム 1track 当たりでもチェレンコフリングをはっきりと観測できる程の性能を達成できている。

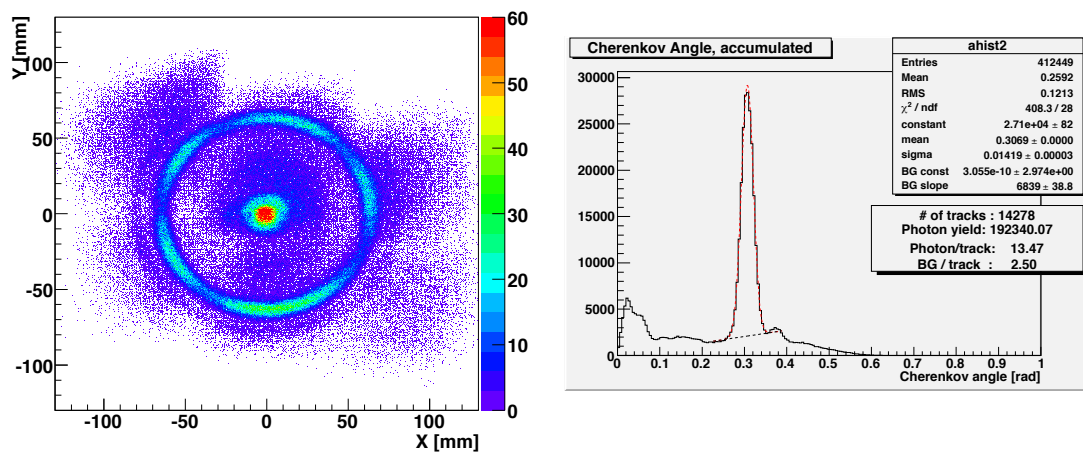


図 5.15: ビームテストの結果。(左) リングイメージ (全 track の合計)、(右) 角度分布。

表 5.4: 2009 年と 2008 年で達成された Aerogel RICH 検出器の性能。

	2009 年	2008 年
Npe/track	13.5	5.7
BG/track	2.5	1.1
角度分解能/ photon[mrad]	14.2	13.3
角度分解能/ track[mrad]	3.9	5.6
K/ π 識別能力 (@4GeV/c)	5.9	4.1

第5章 ビームテストによるプロトタイプ Aerogel RICH 検出器性能評価

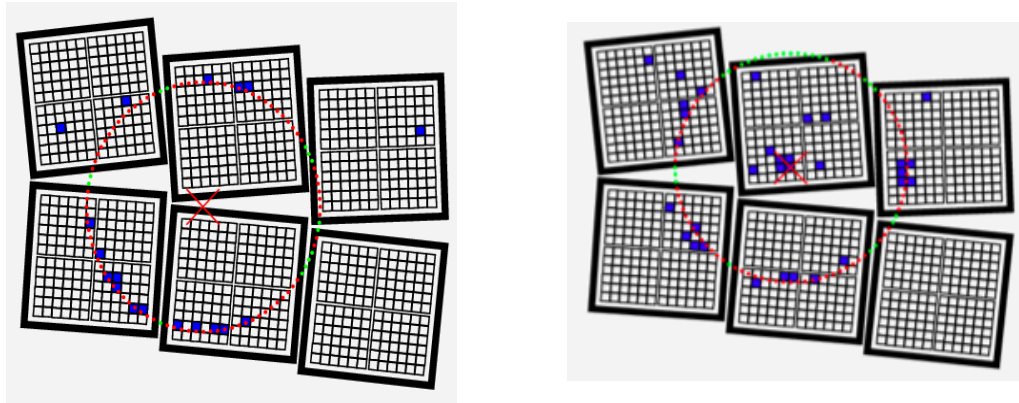


図 5.16: 1track でのリングイメージ。図中の×印はビームの入射位置を表し、円はそこから求めたチェレンコフリング

5.4.4 SA01 と S04 の性能の比較

ビームテストでは SA01 と S04 の比較、QE を高くした HAPD の効果を確認する為に図 5.17 のように HAPD の配置の上下を入れ替えて測定を行なった。この節ではこれらの測定結果から SA01 と S04 の noise と N_{pe} の違いを記述する。

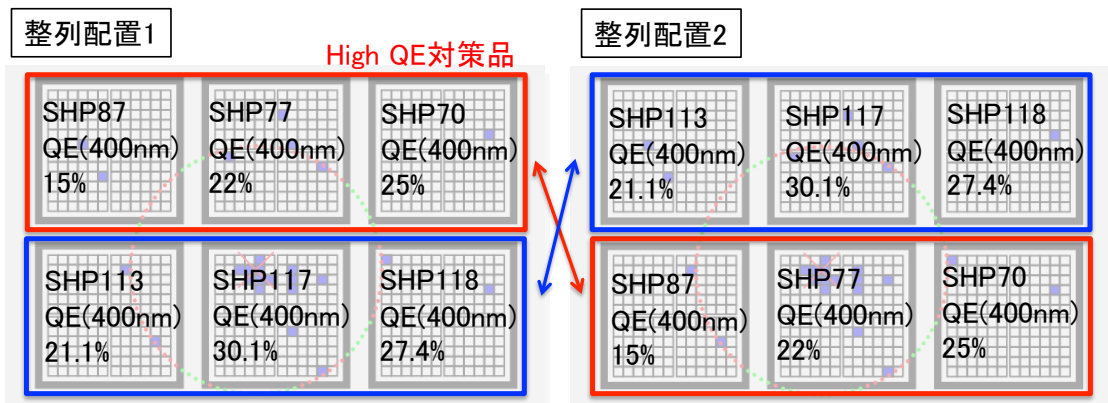


図 5.17: 整列配置での HAPD の配置。右の配置と左の配置では上下を入れ替わっている。

Noise の比較

表 5.5 に SA01 と S04 で読み出しときの各 HAPD の APD チップ毎の noise を示す。この noise は offset 調節の際に行なった Threshold scan の結果から導出してお

5.4. ビームテストの結果

り、noise 分布の標準偏差を noise として定義している。また、APD チップ内のチャンネルの平均を表に記している。

この表で分かるように SA01 の方が S04 より noise が少なく読み出せている。

表 5.5: SA01 と S04 の noise の比較。

HAPD No.	Noise[e ⁻]			HAPD No.	Noise[e ⁻]		
	SA01	S04	SA01/S04		SA01	S04	SA01/S04
87	A	7859	11430	113	A	2075	5364
	B	6779	10653		B	4004	6720
	C	7254	10191		C	9037	4499
	D	6173	9247		D	4105	7819
77	A	4912	7514	117	A	2530	5923
	B	6727	8415		B	4619	5307
	C	4223	6744		C	4398	8029
	D	5272	7454		D	2920	5175
70	A	5849	7844	118	A	2886	4683
	B	3629	5605		B	6435	5898
	C	6065	8904		C	3745	5305
	D	5616	8547		D	3050	5167

検出光電子数での比較

検出光電子数 (N_{pe}) に対しても SA01 と S04 で比較を行なった。 N_{pe} はビームテストで得られたチェレンコフ角度分布を HAPD 毎に fit して導出している。比較は同一の HAPD で行なっているが、ビームテストでは図 5.17 のように ASIC を入れ替えるのではなく HAPD を入れ替えている為、同じ HAPD であっても SA01 で読み出した場合と S04 で読み出した場合では acceptance が異なってしまう (ビームが完全に中心を通過していない為)。そのため、この比較を行なう際にはビームが上段の HAPD と下段の HAPD の間を通過しているイベントのみを抜き出す事によって上下の acceptance を揃えて解析を行なった。

表 5.6 がこの比較の結果を示している。この表より SA01 の方が検出光電子数が多い結果となった。これは、5.4.2 節で述べたように S04 は Threshold 電圧の設定で N_{pe} が減少している為だと考えられる。

第5章 ビームテストによるプロトタイプ Aerogel RICH 検出器性能評価

表 5.6: SA01 と S04 の検出光子数。() 内の数字は上段 3 つの Npe/track を QE で補正して求めた予想値で、同じ位置に配置された HAPD で導出 (SHP113 は SHP087、SHP117 は SHP077、SHP118 は SHP087)。

HAPD No.	QE[%] (@400nm)	Npe/track		
		SA01	S04	SA01/S04
SHP087	15.0	0.64	0.54	1.2
SHP077	22.3	1.97	1.16	1.7
SHP070	25.0	0.31	0.31	1.0
SHP113	21.1	0.99(0.90)	0.80(0.76)	1.3
SHP117	30.1	2.54(2.66)	2.36(1.57)	1.1
SHP118	27.4	0.48(0.34)	0.28(0.34)	1.7

5.4.5 High QE の HAPD による性能向上の検証

図 5.17 の左右の配置では上下を入れ替えたものなので、表 5.6 の上段 3 台と下段 3 台の HAPD を比較すれば High QE の HAPD による性能向上の検証が行なえる。表 5.6 では、上段の HAPD の Npe/track から下段の HAPD で得られる Npe/track の予想値を () で示している。この予想値と実測値は近い値となっており (SHP117 を除いて)、High QE 対策を施した HAPD で検出光子数が増加している事が確認できる。

5.5 中性子照射した HAPD での結果

Belle II 実験では加速器のビームによる background の 1 つに中性子が考えられている。この中性子は radiative Bhabha 散乱 ($e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma$) からの光子が磁石等に含まれる鉄にぶつかる事によって発生する。中性子は中性粒子である為、チェレンコフ光を発生しないが HAPD に損傷を与える可能性がある。そこで、我々は HAPD の中性子照射試験を行ない、その結果より中性子によって APD からの漏れ電流が増加し、noise が増加する事が分かっている (ただし、まだ詳細な測定が進行中である)。

ビームテストでは、中性子により損傷を受けた HAPD でも測定を行ない、その評価を行なった。図 5.18 の左図が中性子照射した HAPD を用いた際の HAPD の配置である。上段の 3 段の HAPD が中性子照射したものとなっており (したがって、中性子照射した HAPD は SA01 で読み出している)、中性子照射量は 0.5, 1.0,

5.5. 中性子照射した HAPD での結果

$2.0 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2$ となっている。なお、中性子照射量 $1.0 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2$ が Belle II 実験の 1 年間分の中性子数に対応すると想定している (つまり、ビームテストでは Belle II 実験 2 年分までの中性子損傷を受けた HAPD で評価している)。また、図 5.18 の右図は中性子照射していない HAPD の配置 (図 5.17 の左図と同一) を示しており、以降ではこの配置での結果を中性子照射した HAPD の結果の reference として記述する。

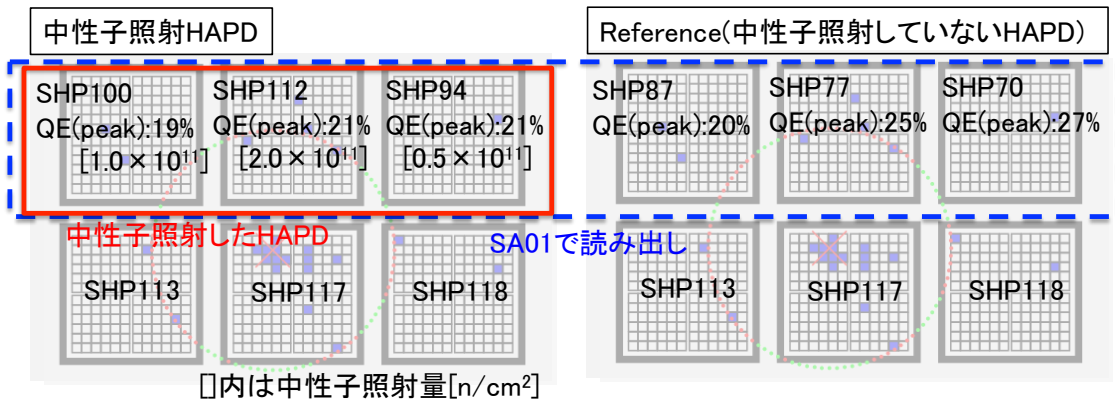


図 5.18: 整列配置での HAPD の配置 (中性子照射)。左が中性子照射した HAPD を用いた配置。右が比較に用いた通常の HAPD での配置 (図 5.17 の左の配置と同一)。

5.5.1 リングイメージと角度分布

図 5.19 が中性子照射した HAPD を用いたビームテストの結果である。左図のように中性子照射した HAPD を用いた場合でもチェレンコフリングの観測に成功しており、中性子照射した HAPD3 台のみでの角度分布 (右図) でも正しくチェレンコフ光のピークが見えている。しかし、ASIC 中のコンパレータに入力する threshold 電圧は noise の 4σ に設定している為、中性子損傷による noise 増加によって検出光子数が減少している (Threshold 電圧が高くなる為) 可能性がある。この減少量を確認する為、各 HAPD 毎に中性子照射した HAPD と reference の HAPD の検出光子数と BG の比較を行なった。

図 5.20 は各 HAPD 毎の中性子照射した HAPD と reference のチェレンコフ角度分布を、表 5.7 にこの角度分布から求めた BG/track と検出光子数 ($N_{pe}/track$) を示す。この結果より、BG/track に関しては中性子照射した HAPD と reference ではほとんど同一の結果となっている (threshold 電圧を noise の 4σ に設定しているので noise の hit 数は変化しない為) が、検出光子数に関してはビームテストで用いた HAPD 中で最も多く中性子を照射した ($2.0 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2$) SHP112 では reference

第5章 ビームテストによるプロトタイプ Aerogel RICH 検出器性能評価

から導出した予想値よりも 43%減少した値となっている(この結果からは他の2つの HAPD では中性子照射による減少は見られなかった)。

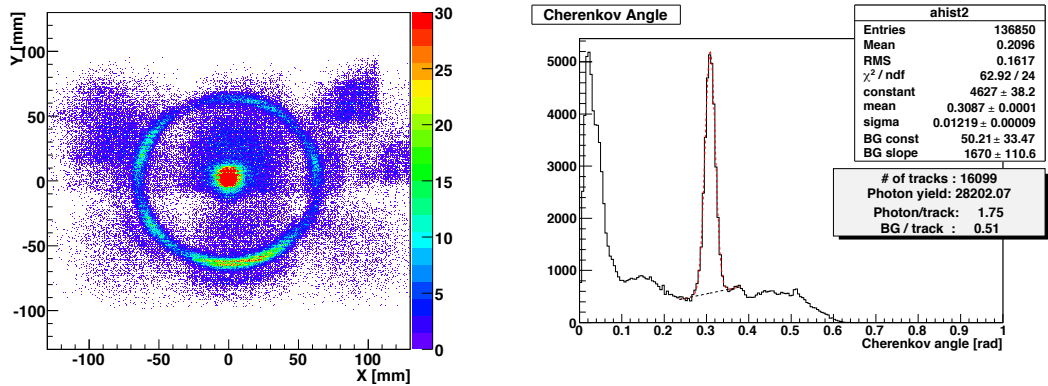


図 5.19: 中性子照射した HAPD でのビームテストの結果。(左) リングイメージ (全 track の合計)、(右) 角度分布 (3つの HAPD の合計)

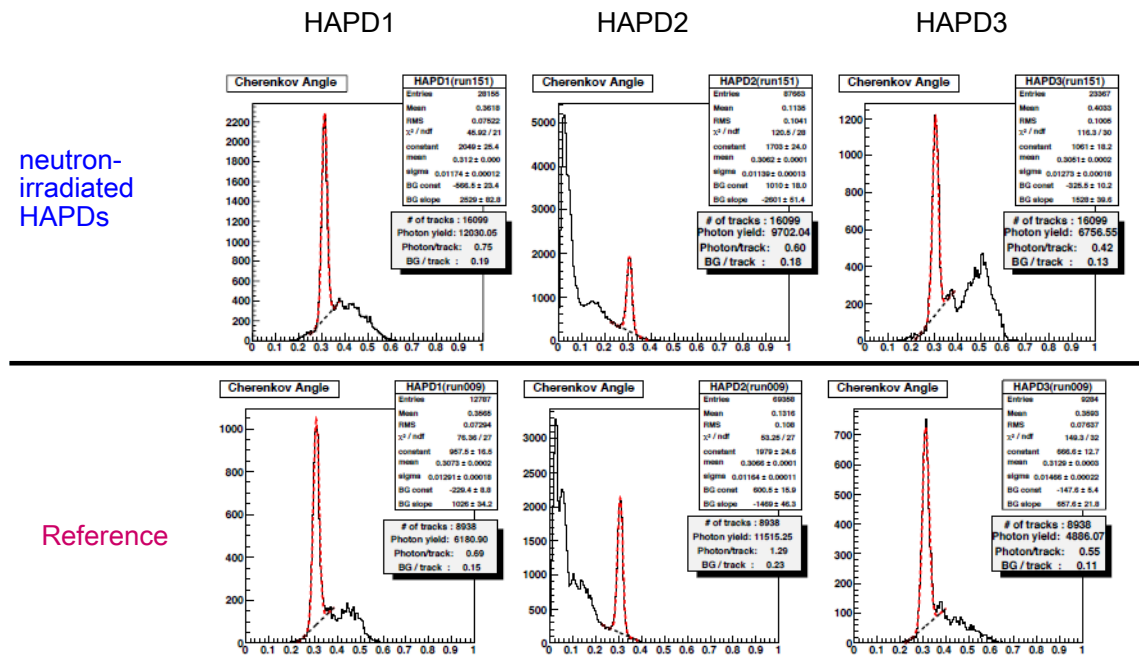


図 5.20: 中性子照射した各 HAPD でのチェレンコフ角度分布。左から HAPD1(SHP100)、HAPD2(SHP112)、HAPD3(SHP94)。上段が中性子照射した HAPD で下段は reference(SHP087、SHP077、SHP070)。

5.5. 中性子照射した HAPD での結果

表 5.7: 中性子照射した HAPD での BG と検出光子数。予想値は reference の結果を QE で補正して導出した検出光子数。合計は HAPD3 台でのチェレンコフ角度分布から導出した値。

HAPD No.	中性子照射量 [n/cm ²]	QE(peak) [%]	BG /track	Npe /track	予想 Npe/track
SHP100	1.0×10^{11}	19.0(19.8)	0.19(0.15)	0.75(0.69)	0.66
SHP112	2.0×10^{11}	20.5(25.2)	0.18(0.23)	0.60(1.29)	1.05
SHP094	0.5×10^{11}	21.2(26.9)	0.13(0.11)	0.42(0.55)	0.43
合計			0.53(0.51)	1.75(2.51)	2.14

() 内は reference

上記で 2.0×10^{11} n/cm² 中性子照射した SHP112 では検出光子数が 42%減少した結果を示したが、SHP112 は図 5.21 の左図のように光電面の位置によって量子効率が異なっており、端の方では中心よりも量子効率が低くなっている。さらに、ビームテストの際にチェレンコフ光が hit しているチャンネルを map してみると、図 5.21 の右図のような結果となり、量子効率の低い端の方に hit していた事が分かる。このため、検出光子数の減少はこの QE の不様性も含まれると考えられ、中性子損傷による検出光子数の減少量は上記の結果よりも小さいと考えられる。

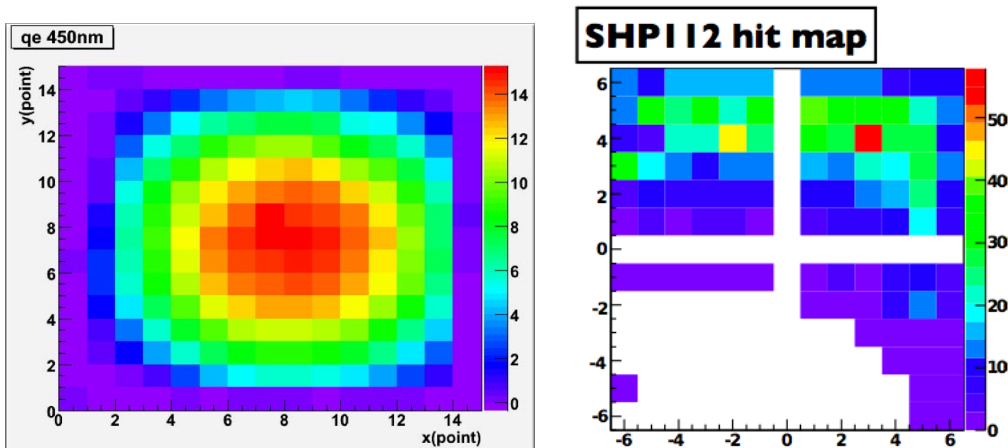


図 5.21: SHP112 の量子効率の一様性 (左) とビームテストの際のチェレンコフ光の hit map(右)。

5.5.2 Shaping time Scan

漏れ電流に起因する noise は、

$$Q_n \propto \sqrt{\frac{I}{e} \times \frac{1}{G} \times \frac{1}{36} \times \Delta t \times F \times G} \quad (5.2)$$

と表される。ここで、 Q_n は漏れ電流による noise、 I は APD からの漏れ電流、 G は avalanche 増幅による増幅率、 F は noise factor、 Δt は信号のピーキングタイムである。この式から増幅回路の整形時定数を短くする事によって noise を減少させる事ができ、中性子照射した HAPD で検出光子数を増加させる事ができると考えられる (noise の 4σ に threshold 電圧にする設定のままで threshold 電圧を低く設定できる為)。

以下、この節では整形時定数を短縮する事による検出光子数と BG の変化を考察し、次節 5.5.3 節において noise level の変化を考察する。

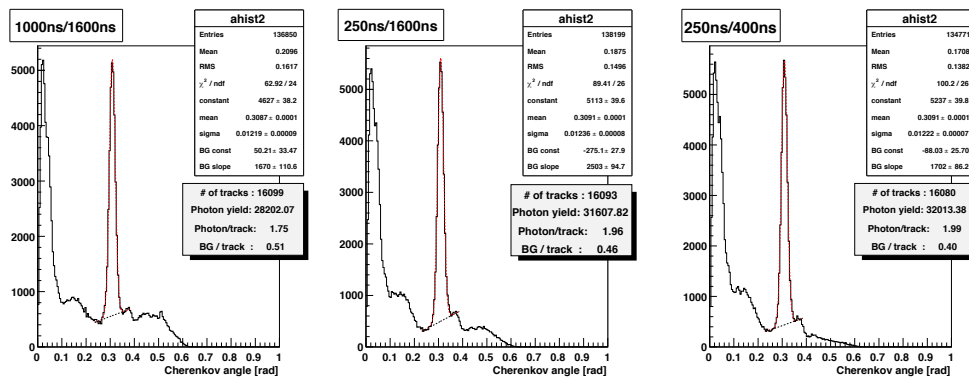


図 5.22: 中性子照射した HAPD で整形時定数、time-window を変化した時のチェレンコフ角度分布。左から整形時定数/time-window が 1000ns/1600ns、250ns/1600ns、250ns/400ns での分布。

図 5.22 は中性照射した 3 台の HAPD での整形時定数を変化させた場合のチェレンコフ角度分布である。この図の一番左がビームテストの標準設定である整形時定数を 1000ns、time-window を 1600ns の結果であり、真ん中が整形時定数のみを 250ns に変更した結果 (time-window は左図と同様の 1600ns)、一番右が整形時定数を 250ns にし、time-window も 400ns に変更した結果である (time-window については 4.2.2 節の FPGA にダウンロードした回路構成の部分を参照。なお、ここで示す time-window は取得データ 4bit の内の 1bit 分の長さを示しており、以降でも同様に記述する)。この角度分布から導出した検出光子数と BG を reference の HAPD での結果と共に示したものを表 5.8 に示す。

5.5. 中性子照射した HAPD での結果

表 5.8: 整形時定数、time-window を変化させた時の検出光子数と BG

検出光子数			
HAPD (中性子照射量 [n/cm ²])	時定数 [ns] /time-window[ns]	Npe/track	
		中性子照射 HAPD	Reference
HAPD1 (1.0 × 10 ¹¹)	1000/1600	0.75	0.69
	250/1600	0.84(+12%)	0.59(-14%)
	250/400	0.87(+16%)	0.64(- 7%)
HAPD2 (2.0 × 10 ¹¹)	1000/1600	0.60	1.29
	250/1600	0.68(+13%)	1.10(-15%)
	250/400	0.67(+12%)	1.12(-13%)
HAPD3 (0.5 × 10 ¹¹)	1000/1600	0.42	0.55
	250/1600	0.44(+ 5%)	0.44(-16%)
	250/400	0.45(+ 7%)	0.46(-12%)
合計	1000/1600	1.75	2.51
	250/1600	1.96(+12%)	2.11(-16%)
	250/400	1.99(+14%)	2.20(-12%)
BG			
HAPD (照射量 [n/cm ²])	時定数 [ns] /time-window[ns]	BG/track	
		中性子照射 HAPD	Reference
HAPD1 (1.0 × 10 ¹¹)	1000/1600	0.19	0.14
	250/1600	0.19(±0%)	0.09(-36%)
	250/400	0.15(-21%)	0.09(-36%)
HAPD2 (2.0 × 10 ¹¹)	1000/1600	0.17	0.23
	250/1600	0.14(-18%)	0.15(-35%)
	250/400	0.13(-24%)	0.15(-35%)
HAPD3 (0.5 × 10 ¹¹)	1000/1600	0.13	0.11
	250/1600	0.12(- 8%)	0.07(-36%)
	250/400	0.10(-23%)	0.06(-45%)
合計	1000/1600	0.51	0.51
	250/1600	0.45(-12%)	0.33(-35%)
	250/400	0.40(-22%)	0.33(-35%)

() 内は 1000/1600 の場合からの変化量

第5章 ビームテストによるプロトタイプ Aerogel RICH 検出器性能評価

この結果より、中性子によって損傷した HAPD では、整形時定数、time-window を短くする事によって検出光子数が増加し (reference では逆に減少しているが)、BG は減少する事が確認できる。

5.5.3 Noise level

表 5.9 は時定数・time-window を変化させた場合の noise の各 HAPD の APD チップ毎の平均値を示している。上表が中性子照射した HAPD のもの、下表が reference(通常) の HAPD のものを示している。これらの表より、時定数・time-window を短縮する事によって通常の HAPD、中性子照射した HAPD 共に noise は減少する事が言える。また、HAPD の HV と bias の設定値から求めた増幅率を信号として S/N 比を導出すると (表中の括弧内)、通常の HAPD では時定数を 1000ns とした場合では全ての HAPD で 9 以上の S/N 比となっており、この場合では時定数の短縮無しでも十分な性能を有していると言える (noise の 4σ に threshold 電圧を設定した場合は、S/N 比が 9 あればチェレンコフ光による信号の 5σ に相当する位置に threshold 電圧が設定されるので、ほとんど全ての信号を検出可能)。対して、中性子損傷を受けた HAPD は照射量が $0.5 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2$ の HAPD では 1000ns の時定数でも問題とならない程度の S/N 比となっているが、照射量が $1.0, 2.0 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2$ の 2 台の HAPD では時定数 1000ns の時では信号をカットせずに検出できる最低の S/N 比 7 よりも低い値となってしまう。ただし、この 2 台の HAPD でも時定数を短縮する事によって十分な S/N 比にする事ができる。

図 5.23 は中性子照射した 3 台の HAPD の noise が時定数・time-window を変化させる事によってどの程度減少するかを示している。この図は、時定数 1000ns, time-window 1600ns とした場合 (黒) の noise を 1 とした場合のグラフとなっており、3 台の HAPD の全チャンネルの noise を示している。また、左図が中性子照射した HAPD、右図が reference の HAPD での noise である。この結果より中性子照射した HAPD では時定数を 1/4 にした場合、noise は時定数短縮する前の 50~70%程度になっていると分かる。式 5.2 より、漏れ電流による noise は時定数の平方根に比例するはずなのでこの結果はこの式と一致している (多少ズレているが、それは漏れ電流以外の要因による noise には時定数を短縮する事によって増加するものがある為である)。対して、通常の HAPD では時定数の短縮による noise の減少量はチャンネル毎にばらつきが見られ、漏れ電流以外を要因とする noise の効果も受けていると考えられる (ただし、noise は全チャンネルで減少しているので HAPD の noise の要因の大部分は漏れ電流によるものと言える)。

5.5. 中性子照射した HAPD での結果

表 5.9: 整形時定数、time-window を変化させた時の HAPD の各 APD チップでの noise の平均値。上表が中性子照射した HAPD、下表が Reference とした HAPD の noise。

中性子照射した HAPD

HAPD No. (中性子照射量)	HAPD 増幅率	Noise[e ⁻] (整形時定数/time-window)			
		1000ns/1600ns	250ns/1600ns	250ns/400ns	
SHP100 (1.0×10^{11} n/cm ²)	A	52000	9179(6.0)	5798(9.4)	4935(11.1)
	B	50400	9604(6.3)	6151(9.0)	5576(10.7)
	C	48000	8373(5.8)	5118(8.9)	4727(10.6)
	D	48000	10188(4.8)	6072(7.8)	5347(9.2)
SHP112 (2.0×10^{11})	A	56000	8676(6.4)	6179(9.5)	5230(11.3)
	B	56000	8823(6.4)	6060(9.4)	5110(11.1)
	C	56000	8939(6.3)	5984(9.7)	5094(11.4)
	D	52000	7949(6.7)	5449(9.6)	4609(11.4)
SHP094 (0.5×10^{11})	A	56000	6490(8.6)	4138(12.9)	3622(15.2)
	B	56000	6749(8.2)	4382(12.6)	3727(14.8)
	C	56000	7988(7.5)	5671(10.0)	5250(11.9)
	D	56000	6634(8.7)	4193(12.6)	3782(14.7)

() 内は S/N 比

Reference

HAPD No.	HAPD 増幅率	Noise[e ⁻] (整形時定数/time-window)			
		1000ns/1600ns	250ns/1600ns	250ns/400ns	
SHP087	A	67500	7859(9.4)	5069(14.1)	4312(16.6)
	B	60500	6779(10.7)	4419(13.7)	4071(16.2)
	C	70000	7254(9.9)	4679(14.5)	4366(17.2)
	D	59650	6173(10.7)	4214(15.0)	3573(17.6)
SHP077	A	62500	4912(13.4)	3801(15.4)	3351(19.2)
	B	62500	6727(10.9)	2667(20.5)	4047(15.7)
	C	50000	4223(13.5)	4635(13.5)	2798(18.9)
	D	46800	5272(10.0)	3899(14.6)	3723(13.3)
SHP070	A	60000	5849(10.6)	3801(15.4)	3327(18.2)
	B	56000	3629(16.6)	2667(20.5)	2267(24.4)
	C	60000	6065(11.1)	4635(13.5)	3936(15.2)
	D	60000	5616(10.9)	3899(14.6)	3492(17.3)

() 内は S/N 比

第5章 ビームテストによるプロトタイプ Aerogel RICH 検出器性能評価

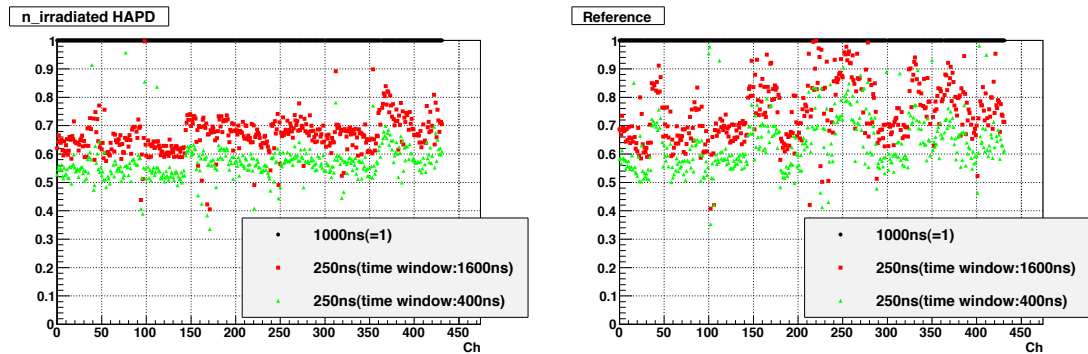


図 5.23: 整形時定数、time-window を変化させた時の noise の減少。(左) 中性子照射した HAPD、(右)reference。整形時定数 1000ns(time window:1000ns) の場合の noise(黒) を 1 とした場合の整形時定数 250ns での noise。緑が time window 1000ns、赤が 400ns のもの。

5.5.4 Threshold scan (HAPD 単体での評価)

ビームテストでは $2.0 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2$ (Belle II 実験 2 年を想定) までの中性子を照射した HAPD を用いて測定を行なった。しかし、Belle 実験は約 10 年間実験を行なっており、Belle II 実験でも同様の期間で実験を行なう事が考えられ、更に多くの中性子照射した HAPD での評価が必要となる。この節ではビームテスト後に行なった $5.0 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2$ (Belle II 実験 5 年を想定) の中性子を照射した HAPD での信号読み出し試験の結果について記述し、その結果から確認された今後の開発の課題について記述する。なお、この節での測定は HAPD と SA01 を接続して行なった threshold scan となっており、LED で光を照射した 1 チャンネルのみの結果を示す (測定方法は 4.2.2 の SA01 と HAPD を接続しての動作検証と同様である)。

$5.0 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2$ の中性子を照射した HAPD の測定結果を示す前に、ビームテストでも仕様した中性子照射量 $2.0 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2$ の HAPD (SHP112) の結果を示し、前節のビームテストの結果とこの測定の間には矛盾が無い事を確認する。図 5.24 が中性子照射量 $2.0 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2$ の HAPD の結果を示しており、左図が整形時定数を 1000ns とした場合、右図が 250ns とした場合である (time-window は両方とも 1600ns としており、HAPD の HV, bias の設定はビームテスト時と同様である)。この結果から分かるように時定数が 1000ns とした場合は S/N 比が悪く 1 光電子相当信号と noise をはっきりと分離できていないが、時定数を短縮する事によって改善され、S/N 比も約 9 となっている。この結果は表 5.9 で示した結果と一致しており、この単体測定の結果から Aerogel RICH 全体の性能を評価する事に問題がないと言える。以降では中性子照射量 $5.0 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2$ の HAPD の Threshold scan 結果から Belle II 実験 5 年の期間での HAPD の使用に問題がないかどうかを考察

5.5. 中性子照射した HAPD での結果

する。

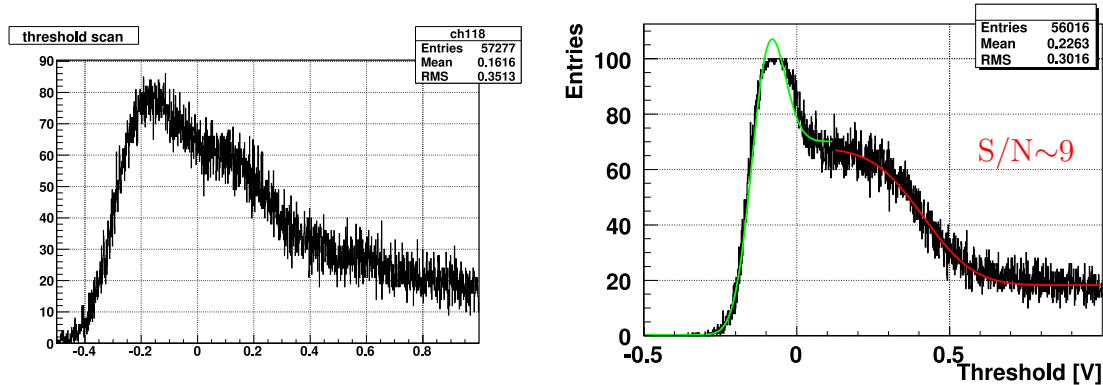
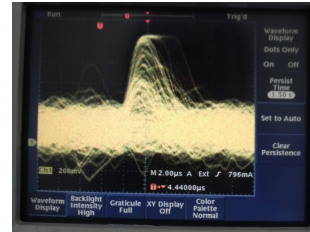
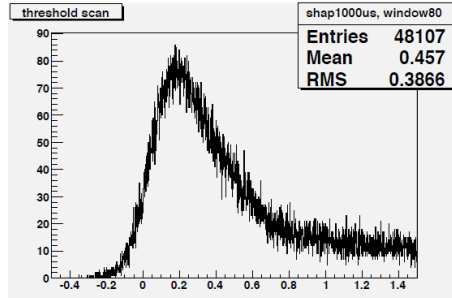


図 5.24: 中性子照射量 $2.0 \times 10^{11} \text{n/cm}^2$ の HAPD(SHP112) での threshold scan 結果。ASIC の整形時定数を 1000ns とした場合 (左) と 250ns とした場合 (右) の結果 (time-window は両方 1600ns)。

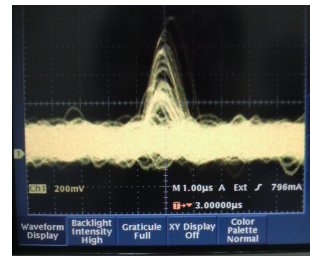
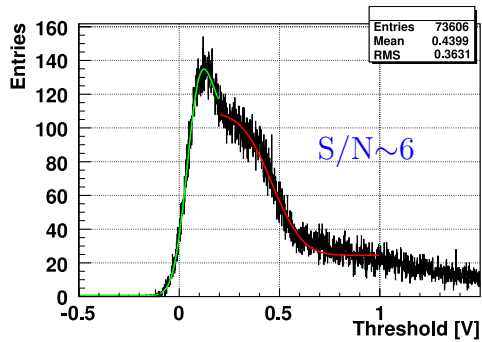
図 5.25 に中性子照射量 $5.0 \times 10^{11} \text{n/cm}^2$ の HAPD(SHP107) の Threshold scan の結果をアナログ信号 (ASIC の増幅回路後の信号) のオシロスコープの画像と共に示す。この図の最上段は整形時定数 1000ns, time-window 1600ns の結果である。Threshold scan 結果、オシロスコープの画像両方から分かるように noise と 1 光電子信号は分離が困難な程 noisy となっており、この状態ではチェレンコフ光を高い精度で観測する事は難しいと考えられる。ただし、ビームテストの結果からも分かるように時定数・time-window を短縮する事によって noise level の減少が可能であり、それによってチェレンコフ光検出能力も向上するはずであるので、整形時定数・time-window 両方を 1/4 に変更して測定を行なった。その結果が、図 5.25 の中段となっており S/N 比の改善が確認され、noise と 1 光電子相当信号の分離もできる程度の結果となった。しかし、S/N 比は約 6 となっておりビームテストと同様に noise の 4σ に threshold 電圧を設定する事を想定した場合、この S/N 比では信号をほとんど全て検出できる値 (最低 7) は達成できていない。ただし、測定時の HAPD の HV、bias の設定は印加可能な最大値から多少低い値としており (ビームテストでも同様である)、印加する HV の値を最大にする事によって S/N 比が向上すると考えられる (bias を高くする事でも HAPD の増幅率が高くなるが、漏れ電流も増加するので S/N 比は向上しないと考えられる。対して HV の高くしても読み出し部分に関わる noise は変化しないはずなので信号のみが大きくなり S/N 比が向上する)。この事を確認する為、HAPD に印加する HV を通常設定の 7.0kV から最大値の 8.5kV に変更して測定を行なった (この変更によって増幅率は約 1.2 倍となる)。その結果が図 5.25 の最下段となっており、S/N 比が向上し 1 光電子相当信号と noise がはっきり区別できている事が分かる。

第5章 ビームテストによるプロトタイプ Aerogel RICH 検出器性能評価

整形時定数:1000ns, time-window:1600ns, HV:7.0kV



整形時定数:250ns, time-window:400ns, HV:7.0kV



整形時定数:250ns, time-window:400ns, HV:8.5kV

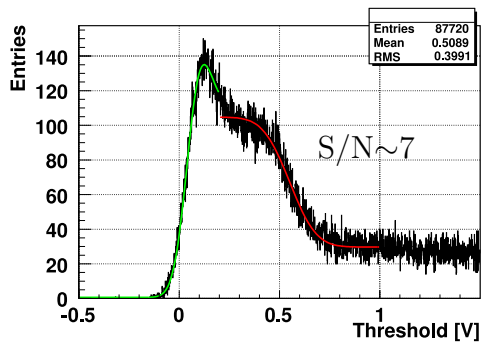


図 5.25: 中性子照射量 $5.0 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2$ の HAPD(SHP107) での threshold scan 結果と 1 光電子信号のオシロスコープ画像。ASIC の整形時定数、HAPD の増幅率を変えた (HV を変更) 場合の結果。

5.5. 中性子照射した HAPD での結果

これまでの結果によって、整形時定数の短縮等によって Belle II 実験 5 年までは HAPD の使用が可能であると分かった。しかし、Belle II 実験 5 年分の中性子照射した HAPD ではかろうじて目標の S/N 比を達成した程度であり、不安が残る。また、更に中性子照射した HAPD では S/N 比の更なる悪化が見込まれる。そのため、HAPD・ASIC の改良が必要となる。現在、考えられる改良点は、

- 薄い APD の HAPD への変更
- HAPD の電子打ち込みによる増幅率の増加
- ASIC の整形時定数の短縮

である。1 番目については HAPD の漏れ電流を減少させる為である。2 つ目は、HAPD の増幅率を高くし信号の大きさを増加させる為であり、HAPD に印加可能な HV を増加させる事によって実現する。3 番目は漏れ電流由来の noise を減少させる為である。今後はこれらの改良を施した HAPD と ASIC の開発と共に更なる中性子照射試験が必要である。

第6章 まとめと今後

Belle 実験は 2010 年夏までには終了し、後継実験である Belle II 実験の為の加速器・測定器のアップグレードも本格化している。この Belle II 測定器へのアップグレード計画として我々が進めている Aerogel RICH 検出器の開発も大詰めとなっている。

この章では本論文で記述した Aerogel RICH 検出器の読み出し電子回路の性能評価の中心とした Aerogel RICH 検出器の現在の開発状況と今後の予定について述べる。

6.1 読み出し電子回路の性能評価について

Belle II 実験で実際に使う事を想定した HAPD 読み出し用 ASIC の SA-series を試作した。この SA-series ではデジタル信号処理を ASIC 内部から排除し、外部の FPGA で行なう事を計画している。このため、SA-series の SA01 と FPGA を搭載したボードを作成し、HAPD からの信号の読み出し試験を行なった。この試験により、HAPD の信号を高い S/N 比で読み出せている事が確認でき、光を照射する位置を変えての 2次元スキャンでも HAPD の各ピクセルがはっきりと区別できる分布が得られ、読み出しとして十分な性能を有している事が確認できた。

この SA01 の結果を受けて、チャンネル数を増加させた SA02 を試作した。SA02 は回路構成に大きな変更は無いが、SA01 での問題点であった 1 光電子相当信号での増幅回路の saturation を改善を施したものとなっている。この SA02 でも性能評価を行い、設計通りの性能を有している事が確認でき、SA02 でも読み出し回路として問題無い事が分かった。しかし、noise level に関しては想定した値より 2 倍以上大きい結果となった。これは外来 noise の影響だと考えられ、小型のパッケージへの変更で減少すると考えられる。

6.2 ビームテストによる Aerogel RICH 検出器の性能評価

Aerogel RICH 検出器全体の性能試験として電子ビームによる照射試験を行なった。この試験は過去にも行なっているが、過去の結果からの課題は検出光子数の増加が挙げられた。このために、今回のビームテストでは改良された Aerogel、HAPD を用いて行なった。その結果、1track 当たりの検出光子数 13.5、識別能力 5.9σ という高い性能を達成できた。また、SA01 と FPGA による読み出しも問題無い事が確認され、過去に試作された S04 よりも高い読み出し性能を有している事も確認できた。

Belle II 実験では中性子が background として想定され、この中性子によって HAPD が損傷を受ける事が分かっている。ビームテストでは中性子照射した HAPD も使用し、中性子損傷を受けた HAPD でもチェレンコフ光の観測に成功した。この結果から検出光子数の減少が確認されたが、ASIC の整形時定数を短縮する事で改善できる事が分かった。

6.3 今後

ASIC と FPGA の読み出しの成功により読み出し回路構成はほぼ完成したと言える。しかし、現在の読み出し用 board はサイズが大きく、読み出し用のケーブルの量が多い等、Belle II 実験の実用を想定すると読み出しシステムにはまだまだ改良の余地がある。また、HAPD に関しても中性子損傷についてはまだ不安があり、更なる中性子照射試験や中性子損傷を受けにくい HAPD の開発・評価が必要である。その他にも量子効率の向上等を計画している。

以下に、読み出しシステムと HAPD の今後の開発の予定を挙げる。

- HAPD
 - 量子効率の向上
 - 電子打ち込みによる増幅率の増加 (S/N 比の向上の為)
 - 中性子照射試験 (薄い APD のサンプルでの試験、照射量の増加等)
- ASIC
 - 小型のパッケージに変更した SA02 の評価
 - SA02 の新しい test-board (コンパクト化、読み出しの工夫)
 - 改良版 ASIC の開発 (時定数の短縮、実用化に向けた改良)

謝辞

本研究を行なうに当たり、多くの方に御協力、御指導を承りました。ここに感謝の弁を述べさせていただきます。

まず、Belle 実験と測定器アップグレードに参加する機会を与えてくださった指導教官の住吉孝行教授、Aerogel RICH 検出器開発グループに加えて頂き、様々な助言を頂いた高エネルギー加速器研究機構の足立一郎助教、西田昌平助教には心より感謝しております。特に、西田昌平助教は実験参加当初から測定方法等を含め多くの御指導を頂き大変お世話になりました。また、宇宙航空研究開発機構の池田博一教授には ASIC の設計・開発の際に数多くの助言を頂き、田端誠氏にはビームテストの際には様々な助力を頂きありがとうございました。加えて、同実験グループに所属し苦楽を共にした名古屋大学の椎塚晋氏にも感謝しております。

首都大学東京高エネルギー実験では汲田哲郎助教、千葉雅美助教、前田順平氏には学会発表の仕方や研究を進める上での基礎知識等の助言を頂き、同期の石川高史氏、香山翔氏、佐藤文孝氏には意見を交換等により支えて頂きました。

上記の方以外にも Belle 実験・Aerogel RICH 検出器開発グループの国内外の共同実験者の方、首都大学東京高エネルギー実験研究室の先輩・後輩等、ここでは書ききれないほど多くの方々にご支援を頂き、心から感謝しております。

最後に私を修士課程に進学させて頂き、生活を支えて頂いた家族と共に、友人、部活の仲間感謝の念を申し上げ、謝辞とさせていただきます。

参考文献

- [1] J. H. Christenson, J. W. Cronin, V. L. Fitch, and R. Turlay, “Evidence for the 2π decay of the K_2^0 meson”, Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 138-140.
- [2] M. Kobayashi and T. Maskawa, “CP-Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction”, Prog. Theor. Phys. 49 (1973) 652-657.
- [3] Ashton B. Carter and A. I. Sanda, “CP violation in B-meson decays”, Phys. Rev. Lett. 23, 1567 (1981) 1567-1579.
- [4] S. Kurokawa and E. Kikutani, “Overview of the KEKB accelerators”, Nucl. Instrum. Meth. A499 (2003) 1-7.
- [5] “PEP-II: An Asymmetric B Factory”, Conceptual Design Report, SLAC-418, LBL-PUB-5379, CALT-68-1869, UCRL-ID-114055, UCIIRPA-93-01, SLAC-0418, SLAC-R-0418, SLAC-R-418 (1993).
- [6] b. Aubert et al., (The BABAR Collaboration), “The BABAR detector”, Nucl. Instrum. Meth. A479 (2002) 1-116.
- [7] K. Abe et. al., (The Belle Collaboration), “Observation of Large CP Violation in the Neutral B Meson System”, Phys. Rev. Lett. 87, 091802 (2001).
- [8] A. G. Akeroyd et al., “Physics at Super B Factory”, hep-ex/0406071 (2004).
- [9] M. Bona et al., “SuperB: A High-Luminosity Asymmetric e^+e^- Super Flavor Factory”, Conceptual Design Report, arXiv:0709.0451 (2007).
- [10] A. J. Buras, “Flavour Theory: 2009”, arXiv:0910.1032 (2009).
- [11] C. Bobeth, G. Hiller, and G. Piranishvili, “CP Asymmetries in $\bar{B} \rightarrow \bar{K}^*(\bar{K}\pi)\bar{l}l$ and Untagged $\bar{B}_s, B_s \rightarrow \phi(\rightarrow K^+K^-)\bar{l}l$ Decays at NLO”, arXiv:0805.2525 (2008).

- [12] U. Egede, T. Hurth, J. Matias, M. Ramon, and W. Reece, “New Observables in the decay mode $\bar{B}_d \rightarrow \bar{K}^{*0} l^+ l^-$ ”, arXiv:0807.2589 (2009).
- [13] W. Altmannshofer et al., “Symmetries and Asymmetries of $B \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-$ Decays in the Standard Model and Beyond”, arXiv:0811.1214 (2009).
- [14] J.-T. Wei et al., (The Belle Collaboration), “Measurement of the Differential Branching Fraction and Forward-Backward Asymmetry for $B \rightarrow K^{(*)} l^+ l^-$ ”, arXiv:0904.0770 (2009).
- [15] S.-K. Choi et al., (The Belle Collaboration), “Observation of a Narrow Charmoniumlike State in Exclusive $B^\pm \rightarrow K^\pm \pi^+ \pi^- J/\Psi$ Decays”, Phys. Rev. Lett. 91, 262001 (2003).
- [16] M. Staric et al., (The Belle Collaboration), “Evidence for $D^0 - \bar{D}^0$ Mixing”, Phys. Rev. Lett. 98, 211803 (2007).
- [17] A. Abashian et al., “The Belle detector”, Nucl. Instrum. Meth. A479 (2002) 117-232.
- [18] K. Abe et al., “Letter of Intent for KEK Super B Factory”, KEK Report 2004-4 (2004).
- [19] I. Adachi et al., “sBelle Design Study Report”, arXiv:0810.4084 (2008).
- [20] C. Gustavino et al., “Performance of glass RPC operated in avalanche mode”, Nucl. Instrum. Meth. A527 (2004) 471-477.
- [21] T. Iijima, “Development of RICH counters towards the KEKB/Belle upgrade”, Nucl. Instrum. Meth. A598 (2009) 138-142.
- [22] H. Ikeda, “Electronics for Particle Measurement”, KEK Report 2002-8 (2002).
- [23] 関貴之 東京都立大学 修士論文 (2004)
- [24] 中川尊 東京都立大学 修士論文 (2006)
- [25] 西澤勲 首都大学東京 修士論文 (2008)
- [26] 植木泰生 首都大学東京 修士論文 (2009)
- [27] 澤藤奈津子 東邦大学 修士論文 (2009)