

修士論文

Belle II 実験のための  
Aerogel-RICH 検出器プロトタイプの性能評価

東邦大学大学院 理学研究科 基礎物理学教室  
6409009 多賀井 里枝

平成 23 年 2 月 25 日

# 目次

第 1 章 序論	1
第 2 章 物理学的背景	3
2.1 パリティ対称性の破れ	3
2.2 CKM 行列と Unitary Triangle	6
2.3 CP 対称性の破れ	9
2.4 KEKB ファクトリー	11
2.5 Belle 検出器	13
2.5.1 Belle 検出器における粒子識別	18
2.5.2 Aerogel Cherenkov Counter(ACC)	20
2.5.3 ACC での粒子識別	21
2.6 Super-KEKB 計画	24
第 3 章 実験装置	25
3.1 動作原理	25
3.2 要求と構成	28
3.2.1 光検出器 HAPD	29
3.2.2 読み出し回路用 ASIC	36
3.2.3 Silica Aerogel	38
3.3 期待される A-RICH 検出器の性能	39
3.3.1 チェレンコフ角度分解能	39
3.3.2 K/ $\pi$ 粒子識別能力	39
第 4 章 HAPD 性能試験と結果	40
4.1 実験準備	40

4.2	性能測定 . . . . .	44
4.2.1	MCA デジタル数値から電子数への換算値 . . . . .	44
4.2.2	ノイズレベル . . . . .	46
4.2.3	単光子検出とゲイン . . . . .	46
4.2.4	1次元, 2次元スキャン . . . . .	48
4.3	結果 . . . . .	53
4.3.1	1 サンプルの性能結果 . . . . .	53
4.3.2	ビーム照射実験で使用したサンプル . . . . .	58
4.3.3	ビーム照射実験前後での性能 . . . . .	62
<b>第 5 章</b>	<b>A-RICH ビーム照射実験と結果</b>	<b>65</b>
5.1	2009 年のビーム照射実験 . . . . .	66
5.1.1	富士テストビームライン . . . . .	66
5.1.2	ビーム照射実験のセッティング . . . . .	67
5.1.3	Focusing タイプの Aerogel . . . . .	70
5.2	データの取得 . . . . .	71
5.3	評価方法 . . . . .	76
5.4	実用に向けたプロトタイプ A-RICH 検出器の性能評価 . . . . .	81
5.4.1	2008 年のビーム照射実験 . . . . .	81
5.4.2	2009 年のビーム照射実験の結果 (過去の結果との比較) . . . . .	82
5.5	最高性能に達したセットアップでの性能評価 . . . . .	86
5.5.1	ビームの入射角度に対する評価 . . . . .	88
5.6	Aerogel 境界にビームが入射した場合の性能評価 . . . . .	92
5.6.1	解析方法 . . . . .	94
5.6.2	Aerogel 境界の有無による性能評価 . . . . .	94
<b>第 6 章</b>	<b>結論</b>	<b>97</b>
	謝辞	99
	参考文献	101

<b>付 録 A HAPD 性能試験補足</b>	<b>103</b>
A.1 エレクトロニクス類の操作方法 . . . . .	103
A.2 各サンプルのゲイン測定結果 . . . . .	105
A.2.1 SHP0070 . . . . .	105
A.2.2 SHP0077 . . . . .	105
A.2.3 SHP0117 . . . . .	105
A.2.4 SHP0118 . . . . .	106
A.2.5 SHP0120 . . . . .	106
A.3 ビーム照射実験前後における各サンプルの2次元スキャン測定 . . . . .	106
A.3.1 SHP77 . . . . .	107
A.3.2 SHP118 . . . . .	107
A.3.3 SHP120 . . . . .	108
A.4 1次元,2次元スキャンの測定手順 . . . . .	108
<b>付 録 B A-RICH ビーム照射実験の解析と生データの対応</b>	<b>117</b>
B.1 実用に向けたプロトタイプ A-RICH 検出器の性能評価 . . . . .	117
B.2 最高性能に達したセットアップでの性能評価 . . . . .	117
B.3 Aerogel 境界にビームが入射した場合の性能評価 . . . . .	117

# 目 次

2.1	パリティ対称性の破れの実験 . . . . .	5
2.2	ユニタリトライアングル . . . . .	8
2.3	$B^\pm \rightarrow \pi^0 K^\pm$ 崩壊 . . . . .	9
2.4	$B^0 \bar{B}^0$ mixing . . . . .	10
2.5	KEKB ファクトリー . . . . .	12
2.6	Belle 検出器 . . . . .	13
2.7	SVD の構造 . . . . .	14
2.8	CDC の構造 . . . . .	14
2.9	ACC の構造 . . . . .	15
2.10	TOF の構造 . . . . .	15
2.11	ECL の構造 . . . . .	16
2.12	EFC の構造 . . . . .	16
2.13	KLM の構造 . . . . .	17
2.14	$\bar{B}^0 \rightarrow J/\Psi K_S$ の崩壊事象例 . . . . .	19
2.15	ACC の配置 . . . . .	21
2.16	チェレンコフ光の発生 . . . . .	22
2.17	Aerogel の屈折率と閾値運動量の関係 . . . . .	23
2.18	Belle 検出器内の構造 (アップグレード前後) . . . . .	24
3.1	A-RICH 検出器の構成 . . . . .	26
3.2	A-RICH の各要素の配置図 . . . . .	27
3.3	Aerogel の屈折率とチェレンコフ放射角度の関係 ( $p=4 \text{ GeV}/c$ ) . . . . .	27
3.4	HAPD . . . . .	29
3.5	HAPD の原理 . . . . .	30
3.6	APD の構造 . . . . .	31

3.7	HAPD の構造図と外観 . . . . .	32
3.8	HV と打ち込みゲインの関係 . . . . .	33
3.9	各 chip のバイアス電圧とアバランシェゲインの関係 . . . . .	34
3.10	HAPD のピン配置とピクセル配置 . . . . .	35
3.11	HAPD 専用読み出し回路 . . . . .	36
3.12	Aerogel とその構造 . . . . .	38
4.1	実験セットアップ . . . . .	40
4.2	性能試験の回路図 . . . . .	41
4.3	性能試験の様子 . . . . .	42
4.4	使用したエレクトロニクス類 . . . . .	43
4.5	換算値測定の配線図 . . . . .	45
4.6	換算値測定の結果 . . . . .	45
4.7	ノイズレベル測定 . . . . .	46
4.8	単光子検出 . . . . .	48
4.9	2次元スキャン装置のセットアップ . . . . .	49
4.10	2次元スキャン装置の回路図 . . . . .	49
4.11	使用した装置 . . . . .	50
4.12	使用したエレクトロニクス類 . . . . .	51
4.13	HAPD のチャンネル配置 . . . . .	52
4.14	SHP70 の性能試験結果 . . . . .	55
4.15	SHP70 のスキャン結果 . . . . .	56
4.16	側管による電場のゆがみ . . . . .	57
4.17	HAPD 全 6 サンプルの性能 . . . . .	59
4.18	2次元スキャン結果 . . . . .	60
4.19	光電子後方散乱 . . . . .	61
4.20	shp70 におけるビーム照射前後の性能測定結果 . . . . .	63
4.21	shp70 におけるビーム照射前後の 2D スキャン結果 . . . . .	64
5.1	富士テストビームライン概略図 . . . . .	66
5.2	ビームエリア . . . . .	67

5.3	ビーム照射のセッティング (装置の概略図)	68
5.4	ビーム照射のセッティング (暗箱の中の様子)	68
5.5	HAPD の配置	69
5.6	Focusing タイプ	70
5.7	プロトタイプ A-RICH における読み出しシステム	72
5.8	HAPD ピクセルと読み出しチャンネルの対応	73
5.9	ASIC のノイズ分布とスレッショホルドの決定	73
5.10	threshold による光電子数・バックグラウンドの変化	74
5.11	A-RICH 側面図	76
5.12	リングイメージとチェレンコフ角度分布の一例	78
5.13	解析手順 1	79
5.14	解析手順 2	79
5.15	2008 年のビーム照射実験の結果 (リングイメージとチェレンコフ角度分布)	82
5.16	08,09 年ビーム照射実験での HAPD の配置	83
5.17	08,09 年ビーム照射実験で得られたチェレンコフ角度分布	84
5.18	1track でのヒット分布	86
5.19	得られたリングイメージとチェレンコフ角度分布	87
5.20	検出光電子数の分布	87
5.21	ビームの入射角度を変えて照射	88
5.22	ビームの入射角度に対するリングイメージ	89
5.23	ビームの入射角度に対するチェレンコフ角度分布	90
5.24	ビームの入射角度に対する A-RICH 検出器の性能	91
5.25	エンドキャップ部の検出器のイメージ	92
5.26	Aerogel 境界の測定のセットアップの様子	93
5.27	Aerogel 境界による影響範囲	93
5.28	解析のための座標設定	94
5.29	Aerogel 境界がある場合に得られたリングイメージとチェレンコフ角度分布	95
5.30	Aerogel 境界の有無による A-RICH 検出器の性能	96
A.1	ビーム照射実験前後の shp77 の結果	107

A.2	ビーム照射実験前後の shp118 の結果 . . . . .	107
A.3	ビーム照射実験前後の shp120 の結果 . . . . .	108
A.4	測定画面 . . . . .	109
A.5	th 設定の説明 (上例の場合) . . . . .	110
A.6	この作業で得られるグラフ (3 枚) . . . . .	111
A.7	中心位置の測定結果 . . . . .	114
A.8	1次元スキャンの測定結果 . . . . .	115
A.9	2次元スキャンの測定結果 (shp70) . . . . .	116



# 表 目 次

2.1	Unitarity Triangle のパラメータと観測事象 . . . . .	8
2.2	$K/\pi$ 粒子識別が必要な崩壊モードとその運動量領域 . . . . .	18
2.3	カウンターモジュールごとの Aerogel 屈折率 . . . . .	21
3.1	HAPD の仕様 . . . . .	32
3.2	SHP70 の最大印加バイアス電圧 . . . . .	33
4.1	使用したエレクトロニクス類 . . . . .	43
4.2	換算値対応表 . . . . .	45
4.3	使用したエレクトロニクス類 . . . . .	51
4.4	ビーム照射実験前の性能結果 . . . . .	62
4.5	ビーム照射実験後の性能結果 . . . . .	62
5.1	08,09 年ビーム照射実験で用いた Aerogel 情報 . . . . .	83
5.2	08,09 年ビーム照射実験で用いた HAPD 情報 . . . . .	83
5.3	08,09 年のビーム照射実験による性能結果 . . . . .	85
5.4	08,09 年のビーム照射実験による A-RICH 検出器の性能 . . . . .	85
5.5	最高性能時に用いていた Aerogel 情報 . . . . .	86
5.6	最高性能を示した時の A-RICH 検出器の性能 . . . . .	87
5.7	入射角度に対する A-RICH 性能評価 . . . . .	91
5.8	Aerogel 境界の測定に用いた Aerogel 情報 . . . . .	92
A.1	使用したエレクトロニクス類 (本文より転載) . . . . .	103
A.2	SHP0070 の試験結果 (2010/10) . . . . .	105
A.3	SHP0077 の試験結果 (2010/09) . . . . .	105
A.4	SHP0117 の試験結果 (2010/10) . . . . .	105

A.5	SHP0118 の試験結果 (2009/11)	106
A.6	SHP0120 の試験結果 (2010/08)	106
A.7	浜松ホトニクス (株) が決めた英字と HAPD-ch の対応	108
A.8	Threshold scan の設定	110
A.9	光量調整の設定	112
A.10	中心位置の設定	113
A.11	1次元 scan の設定	114
A.12	2次元 scan の設定	115
B.1	入射角度と run NO. の対応表	117
B.2	境界の有無に対する run NO.	118

# 第1章 序論

ビッグバン理論によれば宇宙が誕生したとき、粒子と反粒子は同時に作られたと考えられているが現在の宇宙にはほぼ粒子しか存在していない。これには、粒子・反粒子の「CP 対称性の破れ」という現象が起こっていることが関係している。

CP 対称性の破れを説明するために簡単なものに例えると鏡の中の世界である。鏡の中では左右が反転する。しかし、その中で物理法則までは変わらない。このことを「対称性がある」と呼んでいる。鏡に映すような変換の仕方を「P 変換」といい、素粒子の反応で粒子と反粒子を置き換えても通常は、同じ反応が起きる。粒子と反粒子の変換を「C 変換」という。C と P を同時に入れ替えても (CP 変換) 物理法則は同じになると考えられてきたが、1964 年にクローニン、フィッチらが K 中間子の崩壊に関する実験から CP 対称性の破れを発見した。

この対称性の破れの説明に成功したのが小林誠と益川敏英の 2 人である。小林・益川理論では、当時クォークが 3 種類しか知られていなかったが少なくとも 6 種類あれば対称性の破れを説明できるとした。これは現在の素粒子物理学における標準理論の基礎を築いた。その功績を称えられ両者は 2008 年にノーベル物理学賞を受賞した。そして、この小林・益川理論を検証したのが、日本の高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で行われている「B ファクトリー実験」である。この実験は、1999 年に開始され、2001 年に  $B^0 \rightarrow J/\Psi K_s$  への崩壊過程において CP 対称性の破れが観測されたが、小林・益川理論の詳細な検証とさらに標準理論を超える新しい物理の探索を展望に加速器及び検出器のアップグレード計画が進行中である。運動量 3.5 GeV の陽電子ビームと 8 GeV の電子ビームを衝突させ B 中間子と反 B 中間子のペアを大量に作り、それぞれの粒子の壊れ方を測定し、CP 対称性の破れを発見していこうというものである。高エネルギー加速器研究機構の KEKB 加速器を用いた Belle 実験は 2010 年を持って終了し、現在、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さらに統計精度を上げることで、標準モデルを超える新しい物理を観測することを目的としている。

Belle II 実験では稀崩壊事象や崩壊前の B 中間子のフレーバーの同定のために、K 中間子と  $\pi$  中間子の粒子識別が非常に重要である。Belle 検出器の Aerogel Cherenkov Counter(ACC)は輻射体の Aerogel から放出されるチェレンコフ光の有無で運動量 1GeV/c 以上の K/ $\pi$  粒子識別を行っている。しかし、Belle 検出器側面 (Endcap 部) では 2.0 GeV/c 以上の高運動量領域の粒子識別が不可能となっている。そのため、Belle II 実験では新しい K/ $\pi$  粒子識別検出器として Aerogel-Ring Imaging Cherenkov Counter(A-RICH) 検出器の導入を計画しており、開発を進めている。

当研究室では、Belle 実験の ACC グループに属し、検出器の精度向上のための ACC のアップグレードを行っていて A-RICH の開発をしている。ACC の識別運動量領域は 0.5 ~2.0 GeV/c となっていて高運動量領域の識別が不可能となっているが、A-RICH へアップグレードすることによって識別運動量領域を 4.0 GeV/c まで上げることができる。A-RICH は輻射体に Aerogel, リングイメージを観測する光検出器には Hybrid Avalanche Photo Detector(HAPD), ASIC を用いた読み出し回路で構成される。HAPD は Belle 検出器 Endcap 部に設置するため、「十分な有感面積」, 「位置分解能」, 「単光子検出可能」, 「1.5 T の磁場で動作可能」の要求を満たすデバイスとして開発され、4.9 mm×4.9 mm の APD ピクセルを 144 ch 持つ新型のマルチアノード型の光検出器である。

本研究では、A-RICH ビーム照射実験で使用する HAPD のサンプルの性能試験を行い、ビーム照射実験への実用性を確認した。次に HAPD と ASIC の統合試験として A-RICH プロトタイプを製作し、運動量 2 GeV/c の電子ビームによる照射実験を行いチェレンコフリングを観測した。ビーム照射実験では Belle 検出器内設置を想定した配置や電子ビームの入射角度、様々なタイプの Aerogel を使用した場合と実用に向けた検出器の評価を行った。本論文は、研究背景として小林・益川理論や CP 対称性について述べた後、Belle 実験, KEKB 加速器, Belle 測定器の構成について述べる。そして従来の ACC と開発中の新型 A-RICH 検出器の原理、そして HAPD の性能試験、A-RICH プロトタイプのビーム照射実験とその解析結果より得られた性能に関してまとめを行い、今後の展望と構成されている。

## 第2章 物理学的背景

CP 対称性は、1950 年代に発見されたパリティ対称性の破れを回復するために提案された。パリティ対称性とは、素粒子物理学の法則が鏡像反転のもとで不変であるということの意味している。1956 年までパリティ保存はエネルギー保存の法則や運動量保存の法則とともに、いかなる反応においても破れないと信じられていた。しかし、1956 年に李 (リー) 政道と楊 (ヤン) 振寧は分光学的な研究から、原子・分子のエネルギー準位にはパリティの異なる状態が振幅に  $10^{-5}$  程度までなら混ざっている可能性があることを示し、弱い相互作用では空間反転で不変でないと主張し、検証できる可能性のある幾つかの実験を提案した。1957 年には呉 (ウー) 健雄らが李と楊による提案を実験的に検証し、弱い相互作用がパリティ対称性を破ることを明確に証明した。[11][12]

### 2.1 パリティ対称性の破れ

パリティ変換とは空間座標の符号を変える演算のことで、 $\mathbf{x}$  が空間の 3 成分ベクトルであるとし、時間  $t$  をそのままにして

$$t \longrightarrow t, \quad \mathbf{x} \longrightarrow -\mathbf{x} \quad (2.1)$$

と変換するものである。

いま空間反転変換に対する演算子  $P$  を波動関数  $\psi(t, \mathbf{x})$  に作用させると

$$P\psi(t, \mathbf{x}) = \psi(t, -\mathbf{x}) \quad (2.2)$$

この波動関数がハミルトニアン固有状態であり、固有値は縮退していないとすると、

$$\psi(t, \mathbf{x}) = \eta \cdot \psi(t, -\mathbf{x}) \quad (2.3)$$

$\eta$  は本来複素数であるが、空間反転を 2 度行くと元の状態に戻るため  $\eta^2 = 1$  で、 $\eta = \pm 1$  しか存在しないことになる。 $\eta = 1$  の時この波動関数のパリティは正、 $-1$  の時パリティは負

であるという。運動量ベクトル  $p$  に対してパリティ変換をほどこすと

$$p \longrightarrow -p \quad (2.4)$$

となり、パリティは負である。これに対し角運動量のように2つのベクトルのベクトル積  $r \times p$  として表せる軸性ベクトル  $A$  に対しては

$$A \longrightarrow (-1)r \times (-1)p = (-1)^2 r \times p = (-1)^2 A \quad (2.5)$$

となり、パリティは正である。つまり軸性ベクトルは空間反転に際し符号を変えない。

角運動量の固有状態を考えると球面座標で空間反転を表せば  $r \longrightarrow r$  ,  $\theta \longrightarrow \pi - \theta$  ,  $\phi \longrightarrow \phi + \pi$  である。したがって

$$P\psi_{l,m}(\theta, \phi) = (-1)^l \psi_{l,m}(\theta, \phi) \quad (2.6)$$

となり、軌道角運動量  $l$  が偶数であればこの波動関数のパリティは正であり、奇数であれば負となる。これは運動状態によって決まるパリティである。これに対し粒子自身で持っているパリティのことを固有パリティという。これは相対的に定義できるものであり、陽子のパリティを正とすると他粒子の固有パリティはおのずから決定される。

1950年代「 $\theta$  ,  $\tau$ パズル」と呼ばれる問題が存在していた。これは  $K$  中間子の振る舞いを調べたところ、 $K$  中間子とほぼ同じ質量を持つ  $\theta$  と  $\tau$  という2種類の粒子が存在し、

$$\theta^+ \longrightarrow \pi^+ + \pi^0 , \tau^+ \longrightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^- \quad (2.7)$$

という崩壊をするというものである。それぞれの反応の終状態のパリティは逆であるので、両者が同じ粒子 ( $K$  中間子) だとするとパリティが破れていることになる。1956年にコロンビア大学の李 (リー) 政道とニューヨーク州立大学の楊 (ヤン) 振寧は弱い相互作用ではパリティが破れているという理論を提唱した。

- $\beta$ 崩壊におけるパリティ対称性の破れの実験

パリティ対称性の破れの現象は、1957年に呉 (ウー) らによって初めて実験的に確認された。この実験は極低温に冷却した放射性同位体  ${}^{60}_{27}\text{Co}$  を磁場の中に置き、コバルト原子核の磁気モーメント、つまり、スピンを整列させ、 $\beta$ 崩壊



で出てくる電子の数を測定する。この状態にパリティ変換を及ぼすと、スピンは方向を変えずに運動量のみが方向を変える。したがって、スピンと反対の方向に出てくる電子の数を測定し、先の測定と比較する。この2つの測定が一致していればパリティが保存されていることになる。

ウー達の実験を図 2.1(a) に示す。 $^{60}\text{Co}$  は窒化マグネシウム・セリウムの結晶に埋め込まれたうえで、熱運動を抑えるために断熱消磁を用いて、0.01K まで冷却される。そこに外部から磁場をかけて  $^{60}\text{Co}$  のスピンを揃える。十分に冷却したのち、コイルを外してアントラセン結晶を測定器として電子の頻度を測定する。次にスピンの向きを反転させて同じ測定をする。この実験結果は図 2.1(b) となった。測定開始直後で最大の差を示し、時間が経って試料が温かくなるにつれて差がなくなることが確認された。これによってパリティ対称性の破れが証明された。[10]

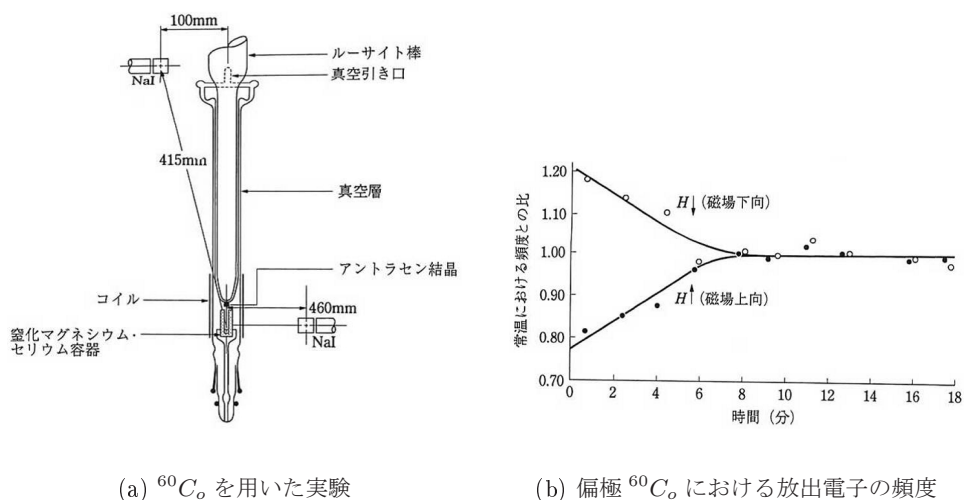


図 2.1: パリティ対称性の破れの実験

パリティ対称性の破れの発見は、弱い相互作用の本質の理解とその後の研究を導くと共に、基本的対称性の破れの研究の重要性を示すことになった。その対称性の一つに CP 対称性の破れがある。

## 2.2 CKM 行列と Unitary Triangle

1964年ブルックヘブン国立研究所で James Watson Cronin, Val Logsdon Fitch らによって K 中間子の崩壊において最初に CP 対称性の破れが発見された。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による小林・益川理論である。提案時(1973年)には u,s,d の3種類のクォークしか存在せず、世代の概念も無かった時代に3世代6種類のクォークの存在を予言し、6種類あれば自然に CP 対称性の破れが導出できることを指摘した。そして、高エネルギー加速器研究機構による実験で  $B \rightarrow J/\Psi K_S$  崩壊における CP 対称性の破れが観測され、小林・益川理論が実証され、現在の素粒子物理学における標準理論の基礎を築いた。その功績を称えられ両者は2008年のノーベル物理学賞を受賞した。

小林・益川理論によると電荷+2/3を持つアップ(u), チャーム(c), トップ(t)の3つのアップ型クォークと、電荷-1/3を持つダウン(d), ストレンジ(s), ボトム(b)の3つのダウン型クォークの合計6個のクォークが存在する。アップ型クォークとダウン型クォークを対として(u,d)を第1世代、(c,s)を第2世代、(t,b)を第3世代と呼ぶ。弱い相互作用を通して世代を超えて異なるクォークに遷移する。この世代間混合を表す行列は式2.9のように示される。

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

$d', s', b'$  は弱い相互作用の固有状態であり、 $d, s, b$  は質量の固有状態である。そしてこの2つの固有状態を結び付けている  $3 \times 3$  の行列  $V_{CKM}$  は Cabibbo-Kobayashi-Masukawa (CKM) 行列と呼ばれる。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。

小林・益川理論において CP 対称性の破れは CKM 行列が位相因子を持つことにより説明される。

ここで、クォークが3世代存在すると位相因子が導入される理由を述べることにする。世代間の混合はユニタリ行列として表現でき、 $N \times N$  ユニタリ行列は一般に  $N^2$  個の独立な行列要素を持つ。このうち  $N C_2 = N(N-1)/2$  個は実数空間の回転角で表すことができ、残りが位相角となる。しかし、 $2N$  個のクォーク場には位相変換の自由度があり、全体に共通な1個の位相を除いた  $(2N-1)$  個の位相はクォーク場に吸収できる。この結果、残る位相



の数は

$$(N-1)^2 - \frac{N(N-1)}{2} = \frac{(N-1)(N-2)}{2} \quad (2.10)$$

となる。したがって、 $N \leq 2$  の場合は混合ユニタリ行列は全て実数で書き直せるので CP 非保存効果は現れず、 $N \geq 3$ 、つまり 3 世代以上の場合に位相因子が存在し、CP の破れが起こり得ることになる。歴史的にはチャーム、ボトム、トップの 3 世代クォークが予言どおりに発見され、小林・益川モデルは検証される以前に標準理論に組み込まれるようになった。CKM 行列は 3 つの混合角と CP 対称性の破れを表す 1 つの位相角で表されるが、混合角は小さく、行列はほぼ対称的であるので、4 つのパラメータ  $(A, \lambda, \rho, \eta)$  を用いる Wolfenstein 表示が使われることが多い。CKM 行列を Wolfenstein 表示で表すと、式 2.11 になる。

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{1}{2}\lambda^2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \frac{1}{2}\lambda^2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

各行列要素を  $\lambda = \sin \theta_c$  (Cabbibo 角:  $\theta_c$ ) で展開している。これまでの実験によって、 $A=0.814 \pm 0.022$ ,  $\lambda=0.226 \pm 0.001$ ,  $\rho=0.143 \pm 0.027$ ,  $\eta=0.350 \pm 0.017$  と求まっていて、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 行列はユニタリ行列なので確率の保存によって各行列要素に対して

$$\sum_i V_{ij}^* V_{jk} = \delta_{jk} \quad (2.12)$$

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

$$V_{ub}^* V_{ud} + V_{cb}^* V_{cd} + V_{tb}^* V_{td} = 0 \quad (2.13)$$

という関係が成り立つ。この式 2.13 を複素平面上に図示すると Unitarity Triangle と呼ばれる図 2.2 の三角形を描くことができる。

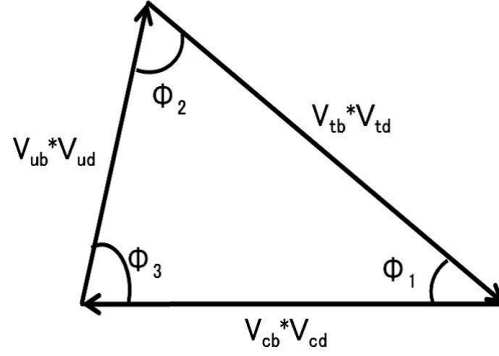


図 2.2: ユニタリトライアングル

このユニタリトライアングルは B 中間子の測定から得られる物理量を表現するのにとても便利なものであり、B 中間子の寿命、 $B^0$ - $\bar{B}^0$  混合、B 中間子崩壊の分岐比、そして CP 非保存の測定からユニタリトライアングルの 3 辺の長さや 3 つの角度を決めることができる。3 つの内角は CKM 行列の各要素を用いて

$$\phi_1 = \frac{V_{cd}V_{cb}^*}{V_{td}V_{tb}^*}, \quad \phi_2 = \frac{V_{ud}V_{ub}^*}{V_{td}V_{tb}^*}, \quad \phi_3 = \frac{V_{cd}V_{cb}^*}{V_{ud}V_{ub}^*} \quad (2.14)$$

と表わされ、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ことで理論の照明を行った。以下の表 2.1 にユニタリトライアングルの精密測定に重要である B 中間子の崩壊モードを示す。[9][10]

表 2.1: Unitarity Triangle のパラメータと観測事象 [17]

パラメータ	観測事象
$V_{ub}^*V_{ud}$	$ V_{ud} $ :known, $ V_{ub} $ : $b \rightarrow u\ell\nu_\ell$
$V_{cb}^*V_{cd}$	$ V_{cd} $ :known, $ V_{cb} $ : $b \rightarrow c\ell\nu_\ell$
$V_{tb}^*V_{td}$	$B^0$ - $\bar{B}^0$ mixing
$\phi_1$	IDCPV: $B^0(t) \rightarrow J/\Psi K_S$ and $B^0(t) \rightarrow J/\Psi K_S$
$\phi_2$	IDCPV: $B^0(t) \rightarrow \pi^0\pi^0$ or $\pi^+\pi^-$ and $B^0(t) \rightarrow \pi^0\pi^0$ or $\pi^+\pi^-$
$\phi_3$	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

## 2.3 CP 対称性の破れ

素粒子の崩壊現象で始状態と終状態に CP 変換をした時に物理法則が不変の場合、「CP 対称である」という。CP 変換の C は電荷反転、P は空間反転を意味する。弱い相互作用において、CP 変換に対して物理法則が不変に保たれていないことが CP 対称性の破れの意味するところである。

Belle 検出器では B 中間子の崩壊における CP 対称性の破れを観測している。B 中間子の崩壊に注目する理由は、標準理論における CP 対称性の破れが正しいとすると、CKM 行列の成分からもわかるように CP 対称性の破れには第三世代 (b) のクォークが関わっていて、尚且つ B 中間子の崩壊現象では CP 非対称が大きく観測されることが予想できるからだ。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)[17]

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

$$\Gamma(A) \neq \Gamma(\bar{A}) \quad (2.15)$$

となる事象を観測することで確認される。

具体的な例として、 $B^\pm \rightarrow \pi^0 K^\pm$  を考える。この反応は図 2.3 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。

このツリー及び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。このように直接的 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 対称性の破れが生じる。

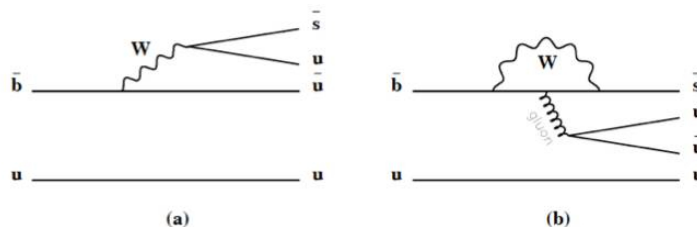


図 2.3:  $B^\pm \rightarrow \pi^0 K^\pm$  崩壊,(a)tree diagram,(b)penguin diagram

- 間接的 CP 対称性の破れ (In-Direct CP Violation)[17]

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 2.4 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・反粒子では変化がなく、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。

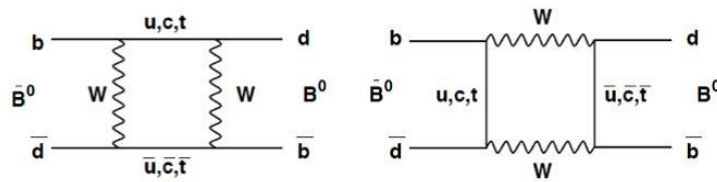


図 2.4:  $B^0 \bar{B}^0$  mixing

小林・益川理論によれば、 $t=0$  に純粋に  $B^0$ ,  $\bar{B}^0$  であったものが、CP 対称性が破れているために  $t=t$  にそれぞれ同じ固有状態  $f_{cp}$  に崩壊する頻度  $\Gamma(t)$  の間に違いが生じると予想される。例えば  $f_{cp} = J/\Psi K_S$  の場合、 $B^0 \rightarrow f_{cp}$  の頻度  $\Gamma(t)$  と、 $\bar{B}^0 \rightarrow f_{cp}$  の頻度  $\bar{\Gamma}(t)$  の非対称パラメータ  $A(t)$  は、

$$A(t) = \frac{\bar{\Gamma} - \Gamma}{\bar{\Gamma} + \Gamma} \quad (2.16)$$

$$= -\xi_f \sin(2\phi_l) \sin(\Delta m_d t) \quad (2.17)$$

と得られる。ここで、 $\xi_f$  は CP の固有値、 $\Delta m_d$  は二つの  $B^0$  の質量固有状態の差、 $\phi_l$  はユニタリトライアングルの内角のうちの一つにあたる。

## 2.4 KEKB ファクトリー

「B ファクトリー」はB 中間子と反B 中間子の対を大量に、あたかも工場(ファクトリー)のように作りだし、b クォークにおける CP 対称性の破れを検出することを目的としている。B ファクトリーは電子と陽電子を異なるリング中に周回させる2リング型であり、電子と陽電子のエネルギーが異なる非対称エネルギー衝突型加速器である。

B 中間子は質量が  $5.28 \text{ GeV}/c^2$  と大きく、大変多くの崩壊モードを有する。たとえば  $B^0 \rightarrow J/\Psi K_S$  の確率は  $10^{-4} \sim 10^{-5}$  と低い。大量に B 中間子のみを生成するために b クォークと  $\bar{b}$  クォークの共鳴状態粒子である  $\Upsilon$  に注目した。 $\Upsilon$  は様々な励起状態があるが、中でも  $\Upsilon(4S)$  は質量が  $10.58 \text{ GeV}/c^2$  と B 中間子を生成するのにちょうど良く、1 psec の寿命を持ち、主に  $B^0, \bar{B}^0$  に崩壊する。B 中間子の飛行距離から崩壊時間を測定するために、生成時に運動エネルギーを持たせる必要がある。そこで、電子・陽電子のエネルギーをそれぞれ 8GeV、3.5GeV と非対称にし衝突させることにより、 $\Upsilon(4S)$  に  $4.51 \text{ GeV}/c$  の運動量を持たせる。崩壊した B 中間子は運動量を持つことができ、電子ビームの方向にローレンツブーストされて約  $140 \mu\text{m}$  進んだ後崩壊する。

B ファクトリーの全体図を図 2.5 に示す。電子を加速するリング HER(High Energy Ring) と陽電子を加速するリング LER(Low Energy Ring) と別々に用意されていて、電子と陽電子はリングの中を互いに反対方向に周回し、筑波実験棟で衝突する。筑波実験棟には B 中間子の崩壊現象を観測する Belle 検出器が衝突点を囲む形で設置されている。筑波実験棟の他に富士実験棟で二つのリングが交差するように設計されている。ここでは二つのリングを上下に設置しすれ違わせている。

2003 年 5 月に設計ルミノシティーである  $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  を達成し、2006 年 11 月 15 日、世界最高記録の  $1.71 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  を達成した。現在も順調にそのデータの蓄積量を増やし、2009 年 11 月には積算ルミノシティー  $1000 \text{ fb}^{-1}$  に到達し、世界最高記録を更新し続けている。[6]

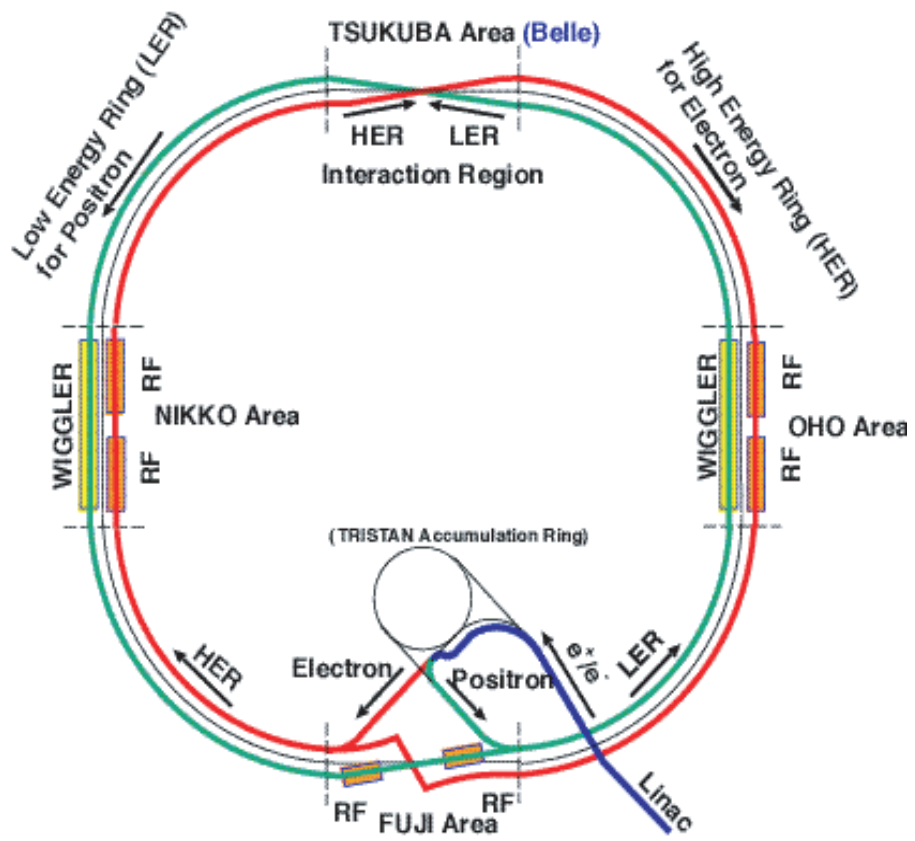
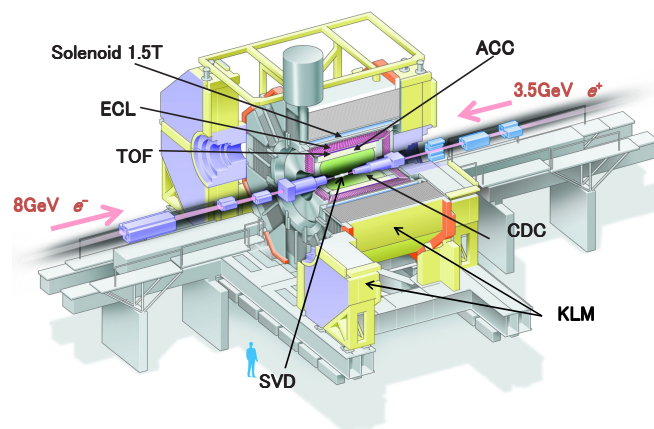


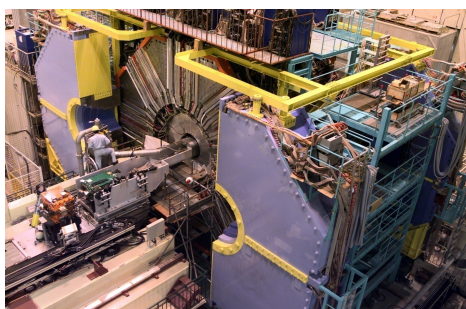
図 2.5: KEKB ファクトリー

## 2.5 Belle 検出器

Belle 検出器はKEKB 加速器で生成された年間 1 億個以上の B 中間子の崩壊を精密に観測する。崩壊で放出されるすべての素粒子の情報を最大限に生かすために、異なる機能を持った複数の測定器が組み合わせられ、高い分析力を実現している。電子・陽電子の衝突点を中心に SVD, CDC, ACC, TOF, ECL(CsI), KLM と層をなすように配置され、円筒形ソレノイド磁石で作られる 1.5T の磁場中で動作している。検出器の概略図と写真を図 2.6 に示す。ここでは個々の測定器の役割について述べていく。なお、以降で出てくる  $\theta$  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。[13][14][15][16][17][19]



(a) 概略図

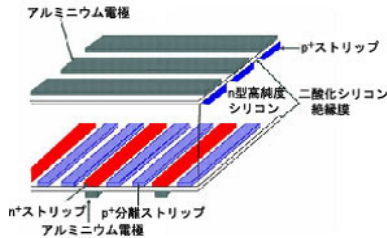


(b) 写真

図 2.6: Belle 検出器

## 1. シリコンバーテックス検出器 (SVD)

衝突点に最も近い所にあり、シリコン基盤上に集積回路の技術を用いて、微細な検出素子や電極を配置した半導体検出器である。B 中間子と反 B 中間子との崩壊位置の差をおよそ  $80 \mu\text{m}$  の精度で測定する。カバーする極角は  $17^\circ \leq \theta \leq 150^\circ$  である。

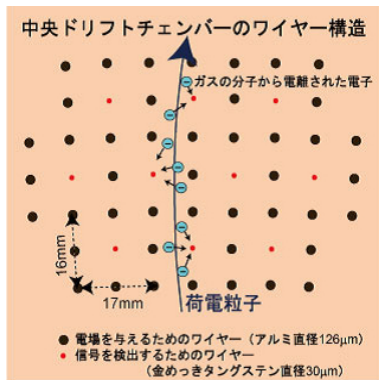


N 型シリコン板両面に電圧をかけるとキャリアの空乏層が形成され、荷電粒子がここを通過すると電子とホールが対が出来る。電子ないしホールを電気信号に変えて検出し、粒子の通過位置を測定する。

図 2.7: SVD の構造

## 2. 中央ドリフトチェンバー (CDC)

SVD の外側に配置され、荷電粒子が飛んだ軌跡を捕えることができ、1.5 T の磁場中での荷電粒子の曲率半径から運動量に関する情報を  $\frac{\sigma_{P_t}}{P_t} \sim 0.5\% \times \sqrt{P_t^2 + 1}$  ( $P_t$  はビーム軸に対して垂直方向の運動量での GeV 単位とする) の精度で測定することが出来る装置である。検出する運動量領域は  $P_t \geq 100 \text{ GeV}/c$  以下であり、ヘリウム-エタンガスを用いたエネルギー損失法 (dE/dx 法) によって  $0.8 \text{ GeV}/c$  以下の運動量領域での  $K/\pi$  識別も行う。ヘリウムとエタンガスの混合ガス中に細い電子線を多数張り巡らし、マイナス電圧をかけガス中で荷電粒子により電離される電子を陽極に、イオンを陰極に集め荷電粒子を感知する。電子やイオンがガス中を飛散して電極に到達するまでの時間を計測することにより荷電粒子の飛跡を正確に知ることができる。測定可能領域は  $-77 \leq Z \leq 160 \text{ cm}$  である。



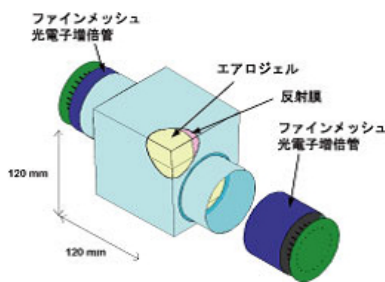
形状は内半径 7.7 cm, 外半径 88cm の金属円筒状の内部に約 34000 本の細い金属線を張り、内部をヘリウムとエタンの混合ガスで満たしている。荷電粒子がガス分子とイオン化する作用を利用する。

図 2.8: CDC の構造



### 3. エアロジェルチェレンコフカウンター (ACC)

崩壊で生成される  $\pi$  中間子と K 中間子を 1.0 GeV/c~3.5 GeV/c の運動量領域において 90 % 以上の効率で識別する装置である。屈折率 1.01~1.03 の Aerogel を輻射体とする閾値型チェレンコフカウンターである。この Aerogel は 0.7 GeV/c 以上の運動量を持った  $\pi$  中間子には発光し、4 GeV/c 以下の運動量の K 中間子には発光しないことで 2 つの粒子の識別が可能になる。チェレンコフ光の検出には高磁場用光電子増倍管 (ファインメッシュ型) を使用し、検出器は CDC の以外に円筒状に設置されている。

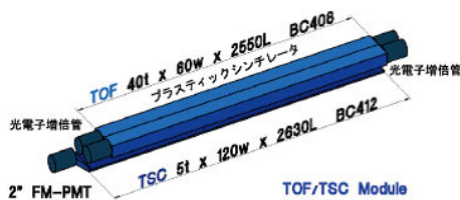


シリカエアロジェルという透明な個体の物質中を光速に近い速さを持つ荷電粒子が通過する時、チェレンコフ光という光を発生する。このチェレンコフ光を利用して、その物質を通った粒子の種類を見分ける。

図 2.9: ACC の構造

### 4. 飛行時間測定カウンター (TOF)

barrel 部の ACC の外側に位置し、飛行時間を 100ps の時間分解能で粒子の速度を測定して粒子の識別をするための検出器である。CDC で測定された運動量と組み合わせ荷電粒子の質量を算出する。1.2 GeV/c 以下の運動量領域での K/ $\pi$  識別も行う。各事象が発生した時間を決めるのにも使用される。Belle 検出器は厚さ 4 cm、長さ 300 cm のプラスチックシンチレーションカウンター 128 台を設置している。測定可能領域は  $34^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$  である。

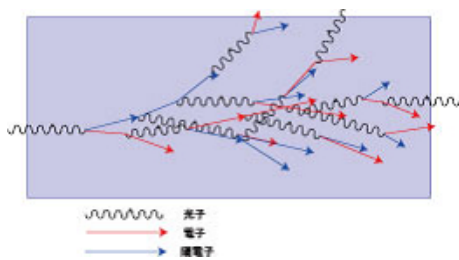


カウンターの両端に取り付けられた光電子増倍管が、荷電粒子の通過によって発生するシンチレーション光を検出し、粒子が衝突点からカウンターに到達するまでの飛行時間を測定する。

図 2.10: TOF の構造

## 5. 電磁カロリメーター (ECL)

ヨウ化セシウム (CsI) 結晶を用いて  $\gamma$  線や電子のエネルギーを正確に測定するための検出器である。すべての結晶モジュールは結晶の正面がビームの衝突点を向くように並べられほぼ全立体角を覆うように設置されている。長さ 30 cm の CsI 結晶を円筒部に 6624 本、前方部に 1216 本、後方部に 1040 本配置してある。各 CsI は 2 cm $\times$ 1 cm のフォトダイオード 2 本によって読み出しされる。 $(\Delta E/E(\text{GeV 単位}) = 0.67\%/\sqrt{E} \oplus 1.8\%)$  エネルギー分解能は 1 GeV の  $\gamma$  線に対し 2 % である。また、CDC での飛跡の有無等の情報を用いることで  $\gamma$  線と電子を同定する事も出来る。電磁シャワーという現象を用いて電子や光子のエネルギーを測定する。

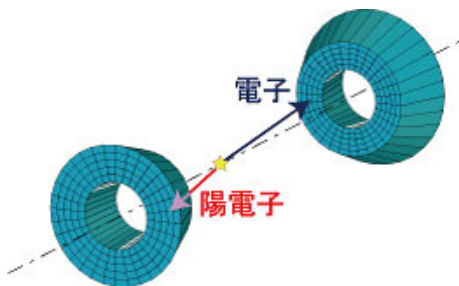


この現象は、ある物質に入った光子や電子のエネルギーがその物質中の中でさらに多数の光子、電子、陽電子を生み出す。Belle 実験では CsI 結晶が発生するシンチレーション光を利用して電磁シャワーのエネルギーを光の量に変換し、フォトダイオードで測定する。

図 2.11: ECL の構造

## 6. 超前方カロリメーター (EFC)

衝突点からみてビームの通り道に近い角度に設置されている一対の電磁カロリメーターである。どのくらいの頻度で電子と陽電子の衝突が起きているかを精度よく調べることは生成される B 中間子-反 B 中間子対の数を知る上で最も重要である。そこで、小さい角度に散乱される電子と陽電子の弾性衝突を測定するための検出器として電磁カロリメーターと同様、電磁シャワーを起こし、そのエネルギーを測定することが出来る超前方カロリメーターを Belle 実験では使用している。

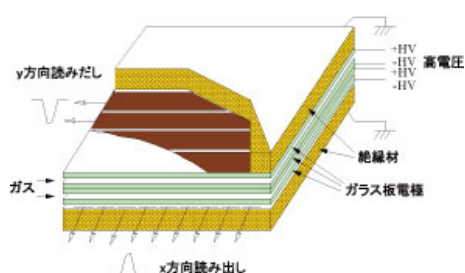


実験中にリアルタイムでビームの衝突頻度 (ルミノシティ) を測定するのに用いられる。荷電粒子が通過するとシンチレーション光が発生する BGO と呼ばれる透明で密度の高い結晶を使っている。

図 2.12: EFC の構造

## 7. $\mu$ 粒子 $K_L^0$ 中間子検出器 (KLM)

物質を通り抜けやすい性質を持っている  $\mu$  粒子と、電氣的に中性で物質と反応するまでは検出できない  $K_L^0$  中間子を検出するための検出器である。厚さ 4.7 cm の鉄板と高抵抗ガラス平行板 (RPC) のサンドイッチ構造で、barrel 部では 14 層+15 層、endcap 部では 14 層+14 層で構成されている。RPC はガラスなどの衝撃の強い電気抵抗を持つ平らな板を数 mm 間隔を保って並行に設置し、この間をアルゴンとイソブタンの混合ガスで満たし、高抵抗体にプラスとマイナスの高い電圧を印加する。ガス中を荷電粒子が通り抜けるとガスが電離して電子とイオンを作り、これらが電極と薄い絶縁膜を介して取り付けられた電気用電極板に電気信号を誘発、これを検知することにより粒子を検出する。



高抵抗板検出器は放電を利用したガス・チェンバーの一種である。Belle 検出器の最も外側に位置し、貫通力の強い  $\mu$  粒子のみが鉄板を通過し、その他の粒子は止まってしまう。これより、RPC に飛跡を残した粒子が  $\mu$  粒子であると特定できる。

図 2.13: KLM の構造

## 8. 超伝導ソレノイド電磁石

ソレノイド型超伝導磁石は、厚さ 30 cm, 直径 3.4m, 長さ 4.4 m の円筒形になっていて、1.5 T の強磁場を作る。ビームに対するソレノイド磁場の影響を最小限にするためにソレノイド磁場の方向は電子ビームの走る方向と同じになっている。この磁場によって曲げられた荷電粒子の軌跡から粒子の運動量を測定する事が出来る。コイルは、ニオブ・チタン合金超伝導材を使った線材で巻かれ、液体ヘリウム冷凍機により  $-268$  °C まで冷却されて超伝導状態になっている。

### 2.5.1 Belle 検出器における粒子識別

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う上で、検出可能な終状態の粒子である光子、電子、 $\mu$  粒子、ハドロン ( $\pi, K$  等) の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を取り出す必要がある。特に高い精度での  $K/\pi$  粒子識別が Belle 実験では必要とされている。そのため明確に粒子同定されたデータを提供できる実験装置が非常に重要となる。

CP 対称性の破れを調べるにあたって必要な  $B^0$ ,  $\bar{B}^0$  中間子が同じ終状態に崩壊する時の時間分布の破れを得るためには粒子識別が重要である。主に観測する崩壊モードのうち粒子識別の必要となるモードとその測定のバックグラウンドとなり排除すべきモード (リジェクションモード) を表 2.2 に示す。

表 2.2:  $K/\pi$  粒子識別が必要な崩壊モードとその運動量領域

物理現象	崩壊モード	運動量領域 [GeV/c]	リジェクションモード
Flavor Tagging	$b \rightarrow c \rightarrow s$	$0.2 < p < 1.5$	-
$\phi_1$	$B^0 \rightarrow J/\Psi K_S$	-	-
$\phi_2$	$B \rightarrow \pi\pi$	$1.8 < p < 3.8$	$B \rightarrow K\pi$
$\phi_3$	$B \rightarrow DK$	$1.5 < p < 3.3$	$B \rightarrow D\pi$

B 中間子における崩壊事象において Unitarity Triangle の内角  $\phi_1$  を測定するためには  $B^0, \bar{B}^0$  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  $B^0, \bar{B}^0$  のどちらかの崩壊であっても同じであるため親粒子が  $B^0, \bar{B}^0$  のどちらであるかを決定することが出来ず、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  $B^0, \bar{B}^0$  のどちらかであるか決定することを Flavor Tagging という。

$B^0, \bar{B}^0$  のうち CP 固有状態  $J/\Psi K_S$  に崩壊しない一方の粒子 ( $B^0$  または  $\bar{B}^0$ ) は通常カスケード崩壊と呼ばれる  $b \rightarrow c \rightarrow s$  の崩壊形式に従って、 $B \rightarrow D \rightarrow K$  のように崩壊する。

$$B^0 \rightarrow \bar{D} \rightarrow K^+ \quad (2.18)$$

$$\bar{B}^0 \rightarrow D \rightarrow K^- \quad (2.19)$$

親粒子が  $B^0$  か  $\bar{B}^0$  であるか知るためには、崩壊後の粒子が  $K^+$  か  $K^-$  が識別できればよい。終状態において B 中間子から生成された大量の  $\pi^\pm$  からカスケード崩壊による  $K^\pm$  (図

2.14) を効率よく識別することが必要である。また  $\phi_2$  の測定においては  $\pi\pi$  に崩壊するのと同じ割合で  $K^+\pi^-$  にも崩壊する。 $\phi_3$  では観測したい崩壊  $DK$  とバックグラウンドの  $D\pi$  を区別しなくてはならない。

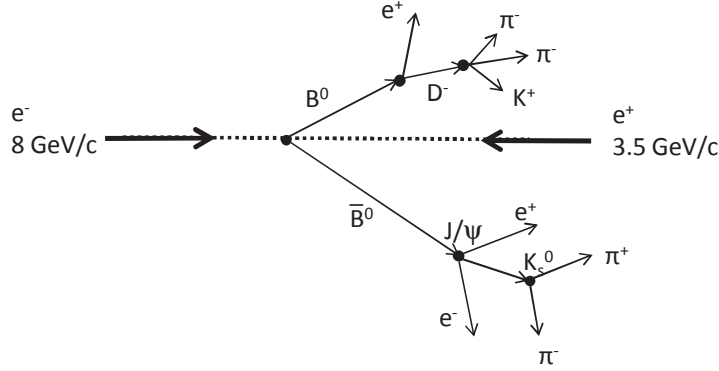


図 2.14:  $\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_S$  の崩壊事象例

Belle 検出器で  $K/\pi$  粒子識別を行っている検出器は CDC, TOF, ACC で、粒子の崩壊モードから識別が要求される運動量領域は  $0.2 \text{ GeV}/c \sim 3.8 \text{ GeV}/c$  (表 2.2 参照) である。

粒子識別は運動量  $p$  と速度  $\beta$  を測定し、式 2.20 から質量  $m$  を求めることによって行う。質量  $m$  は運動量  $p$  と速度  $\beta$  を用いると

$$m = p \sqrt{\frac{1}{\beta^2} - 1} \quad (2.20)$$

と表される。そして、運動量  $p$  は CDC で測定された粒子の曲率半径  $\rho$  と磁場  $B$  より、

$$p = 0.3\rho B \quad (2.21)$$

を用いて求める。速度  $\beta$  は、CDC と TOF それぞれで測定を行う。

CDC で測定される速度は電離損失を測定する  $dE/dx$  法を用いる。荷電粒子が物質中で電離損失により失う単位長さあたりのエネルギーは式 2.22 と表わされ、CDC での電離損失を測定することで  $0.8 \text{ GeV}/c$  以下の低運動量領域の速度  $\beta$  を求めることができる。性能的には運動量  $2.5 \text{ GeV}/c$  以上でもある程度の  $K/\pi$  識別は可能であるが十分ではない。エネルギー分解能は  $\frac{\rho dE/dx}{dE/dx} \cong 5\%$  である。

$$-\frac{dE}{dx} = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \ln\left(\frac{2m_e \beta^2 \gamma^2 E_{max}}{I}\right) - \frac{\beta^2}{2} - \frac{\delta}{2} \quad (2.22)$$

$K = 0.307 \text{ MeV/g} \cdot \text{cm}^2$  : 荷電粒子の電荷数

$z$  : 荷電粒子の電荷数

$Z$  : 媒質の原子番号

$A$  : 媒質の質量数

$I$  : 物質の ionization potential

$E_{max}$  : maximum measurable energy

$\frac{\delta}{2}$  : density effect による補正項

一方 TOF では飛行時間測定法を用い、衝突点からシンチレーターで検出されるまで荷電粒子が実際に飛行した距離  $L$  と飛行時間  $\Delta t$  を測定することにより速度  $\beta$  を求める。時間分解能は 100 ps で 1.2 GeV/c 以下の運動量領域で速度  $\beta$  を測定することができる。

$$\beta = \frac{L}{c \cdot \Delta t} \quad (2.23)$$

K/ $\pi$  識別が必要な運動量領域は 0.2 ~ 3.8 GeV/c であることは述べたが、CDC, TOF で粒子識別が可能な運動量領域はエネルギー分解能、時間分解能の関係から 1.2 GeV/c までである。そこで、1.2 GeV/c 以上の高運動量では ACC で K/ $\pi$  粒子識別を行う。

## 2.5.2 Aerogel Cherenkov Counter(ACC)

ACC は CDC と TOF の間に衝突点を取り囲むように外半径 885 mm, 円筒形状に配置されている Barrel ACC(BACC) と衝突点+Z 方向にある Endcap ACC(EACC) からなる (図 2.15)。BACC は円筒上で  $\phi$  方向に 60 セグメント (Cell) に分割され 1 Cell あたり 16 個, 60 Cell で 960 個のカウンターモジュールからなる。モジュールは Aerogel の屈折率、読み出し系の PMT の口径・数量の違いから A~I カウンターの 9 種類が存在する。EACC は 12 セグメントに分割されており 1 Cell あたりモジュール数は 16 個である。(各 Cell ごとに同一中心の 5 つのレイヤーを持ち各カウンターモジュールの総計は 228 個になる。) EACC は衝突点からの角度  $17^\circ \sim 34^\circ$  をカバーするように設置されている。

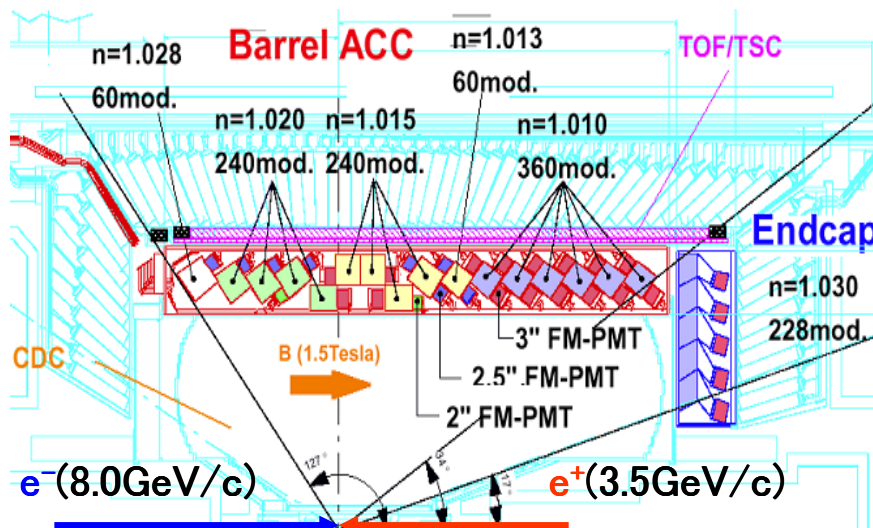


図 2.15: ACC の配置 [13]

表 2.3: カウンターモジュールごとの Aerogel 屈折率 [13]

カウンター名称	数量	屈折率
BACC - A	360	1.010
BACC - B	60	1.013
BACC - C	60	1.013
BACC - D	60	1.015
BACC - E	120	1.015
BACC - F	60	1.020
BACC - H	120	1.020
BACC - I	60	1.028
EACC	228	1.030

### 2.5.3 ACC での粒子識別

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。荷電粒子の速度  $v$  が通過する物質中での光の速度  $c/n$  より速い場合に、粒子のエネルギーの一部がチェレンコフ光として輻射される。その原理を利用して粒子識別を行うのがチェレンコフカウンターである。図 2.16 はその様子を表したもので  $\beta c$  ( $\beta = v/c$ ) は荷電粒子の速度、

$n$  は屈折率、 $\theta_c$  は荷電粒子が通過した飛跡を軸とした時のチェレンコフ放射の角度である。  
チェレンコフ光が放出される条件は

$$\beta > \frac{1}{n} \quad (2.24)$$

のときで、放出角度  $\theta_c$  は

$$\theta_c = \cos^{-1} \frac{1}{n\beta} \quad (2.25)$$

となり、粒子の進行方向を軸にして円錐状に放射される。また、発生するチェレンコフ光の光子数  $N$  はフランク・タムの式で表わされる。

$$N = 2\pi\alpha L \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\sin^2 \theta_c}{\lambda^2} d\lambda \quad (2.26)$$

ここで、 $\alpha$  は微細構造定数、 $L$  は粒子が物質中を通過した距離、 $\lambda$  は発生した光子の波長 [mm] である。

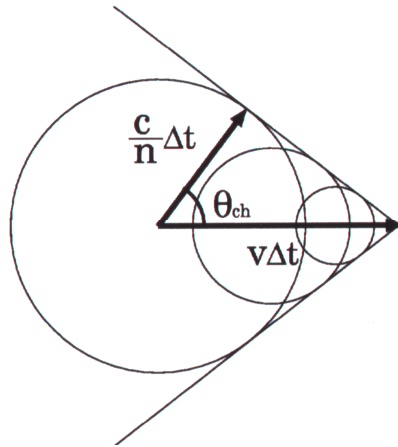


図 2.16: チェレンコフ光の発生 [13][16]

チェレンコフ放射が起こりえる最小の粒子速度を閾値速度  $\beta_{th}$  とすると式 2.24 から

$$\beta_{th} = \frac{1}{n} \quad (2.27)$$

$$(2.28)$$

となり、閾値運動量  $p_{th}$  は相対性理論における運動量  $p$  から

$$p_{th} = \frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \quad (2.29)$$



と決まる。 $\pi$  中間子、 $K$  中間子、陽子について閾値運動量  $p_{th}$  と屈折率  $n$  の関係を図 2.17 に示す。たとえば屈折率 1.01 の Aerogel を輻射体とした場合、運動量 0.98 GeV/c ~ 3.48 GeV/c の入射粒子に対しチェレンコフ光が放出された場合は  $\pi$ 、その逆は  $K$  というように粒子識別が可能である。Aerogel の屈折率を変えることによりチェレンコフ輻射を起こす閾値運動量を決めてやることができ、粒子識別の運動量領域を決定することができる。[13][16]

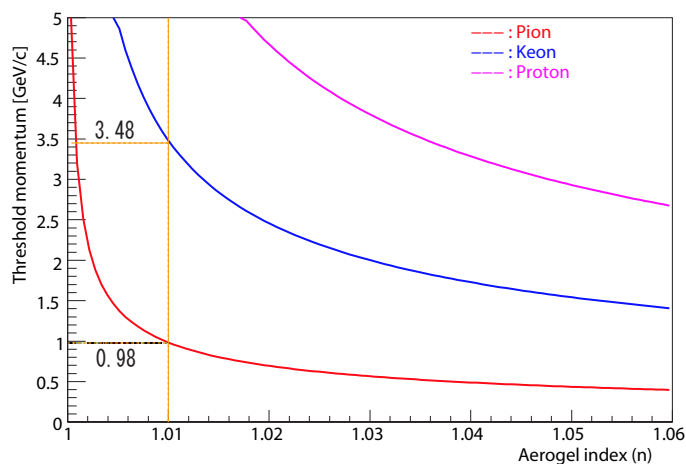


図 2.17: Aerogel の屈折率と閾値運動量の関係

識別可能な運動量領域は Aerogel の屈折率で決まることは述べた。識別運動量は BACC が 0.5~3.5 GeV/c であるのに対し、EACC では 0.5~2.0 GeV/c と 2.0 GeV/c 以上の運動量領域において粒子識別が不可能となっている。EACC では 1.2 GeV/c 以下の低運動量領域の粒子識別を行う TOF と ACC を同時搭載することが空間制約 (面積 4.6 m<sup>2</sup>, 奥行き 30 cm) 上困難であったため、TOF の代わりに ACC で低運動量領域の粒子識別を行うことにし、屈折率  $n=1.030$  の Aerogel を選んだ。現状の EACC の高運動量粒子識別を達成することが Belle 実験の精度向上における課題の一つである。

## 2.6 Super-KEKB 計画

1999 年の実験開始以来、B ファクトリーは世界最高ルミノシティ更新し続け、積算ルミノシティは約  $1000 \text{ fb}^{-1}$ 、 $B \bar{B}$  中間子を約  $10^9$  ペア生成した。2001 年に  $B \rightarrow J/\Psi K_S$  の崩壊モードで CP 非対称を観測し、小林・益川理論の正しさを実証した。[6]

これからの B ファクトリーは従来加速器の 50 倍のルミノシティの加速器を建設し、更なる稀な B 中間子の崩壊事象の観測や  $D \bar{D}$  混合における CP 非対称の精密測定やタウ粒子の崩壊など、標準理論を超える新物理探索を目指し、加速器と検出器のアップグレード計画 (Super-KEKB 計画) が KEK とイタリアの INFN 研究所を含む研究グループによって進行中である。

アップグレードは 2009 年から開始され、最初の 3 年間で B ファクトリーをシャットダウンし、加速器と検出器の本格的なアップグレードを行う予定である。そして、実験再開後の 2 年でルミノシティ  $2 \times 10^{35} / \text{cm}^2 / \text{sec}$  を達成することが初期目標となっている。[7]

Aerogel-RICH グループでは Super-KEKB 実験に向けた新型粒子識別装置 Aerogel-Ring Imaging Cherenkov Counter (A-RICH) の開発を行っている。従来の Belle 検出器の Endcap 部では高運動量領域における粒子識別が不可能であることは述べた。Endcap 部に搭載予定である A-RICH は  $K/\pi$  識別の運動量を  $4.0 \text{ GeV}/c$  まで向上させることを目標に開発を行っている。図 2.18 には Belle 検出器のアップグレード前後の構成図を示している。A-RICH 検出器の原理や構成に関しては 3 章で述べる。

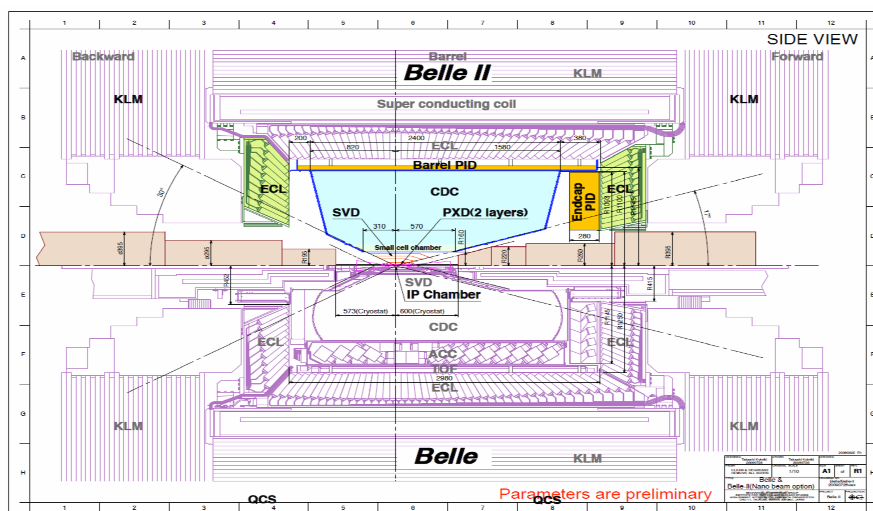


図 2.18: Belle 検出器内の構造 (アップグレード前後)

## 第3章 実験装置

Belle II 実験では Belle 実験よりもさらに精度の高い  $K/\pi$  粒子識別が必要となる。現在の Belle 測定器の  $K/\pi$  粒子識別能力では、CDC・TOF・ACC の 3 つの検出器での  $K/\pi$  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  $\pi$  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ことを計画しており、全データ量に対して 95% の効率で  $K$  と  $\pi$  粒子を検出し、fake rate を 1% 程度で  $K/\pi$  粒子識別を行うことを目指している。特に endcap 部の ACC では  $K/\pi$  粒子識別運動量領域が  $0.5 < p < 2.0[\text{GeV}/c]$  となり、2 体崩壊で生成された高運動量の粒子の識別が不可能となっている。そこで ACC グループでは、endcap 部での高運動量領域 ( $0.5 < p < 4.0[\text{GeV}/c]$ ) での  $K/\pi$  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。その新型検出器が Aerogel-RICH 検出器である。

### 3.1 動作原理

従来の Aerogel Cherenkov Counter (ACC) ではチェレンコフ光発光有無で粒子識別をしていたのに対し、新型の Aerogel Ring Imaging Cherenkov Counter (A-RICH) では図 3.1 のように輻射体 Aerogel、光検出器 Hybrid Avaranche Photo Detector (HAPD)、読み出し回路 ASIC で構成され、 $K/\pi$  粒子で Aerogel から放射されるチェレンコフ光を光検出器でリングイメージとして捉え粒子識別を行う検出器になっている。

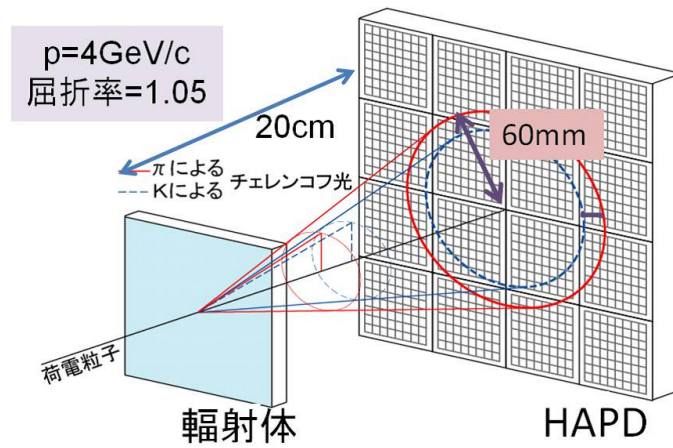


図 3.1: A-RICH 検出器の構成

入射する粒子の質量  $m$ , 運動量  $p$ , Aerogel の屈折率  $n$ , チェレンコフ光の放射角度  $\theta_c$  の関係は

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

となる。

図 3.2 のように Aerogel と HAPD との間隔を  $L$ 、HAPD 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、

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

と表せる。

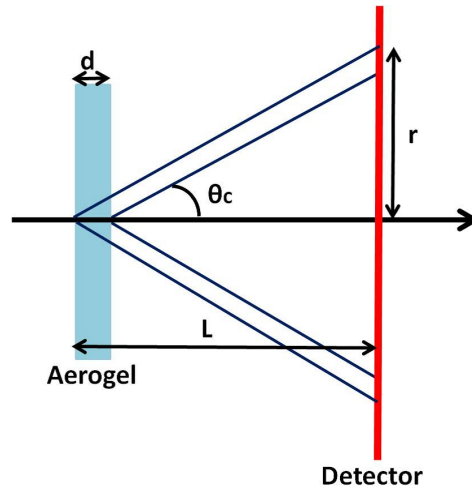


図 3.2: A-RICH の各要素の配置図

また、粒子の運動量  $p=4.0 \text{ GeV}/c$ 、Aerogel の屈折率  $n=1.05$  の時、 $K/\pi$  が作るチェレンコフ光の角度差は図 3.3 より

$$\theta_c(K) - \theta_c(\pi) = 23 \text{ mrad} \quad (3.3)$$

となり、この角度差を  $4\sigma$  以上の信頼度で粒子識別をすることを検出器の目標としている。また、設置予定である Endcap 部の空間制約より Aerogel から光検出器までの距離は 20cm と決まっている。

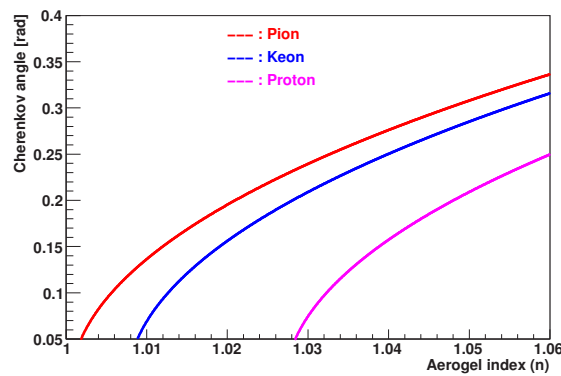


図 3.3: Aerogel の屈折率とチェレンコフ放射角度の関係 ( $p=4 \text{ GeV}/c$ )

## 3.2 要求と構成

Endcap 部設置上の空間制約と角度分解能から光検出器と読み出し回路には以下の要求が挙げられる。

まず、光検出器への要求として

- チェレンコフ光の単光子が検出可能
- 1.5 T の磁場で安定な動作をすること
- 十分な位置分解能 (1 ピクセル 5mm × 5mm 以下)
- 30 cm の奥行きに設置可能

1つ目の理由として、チェレンコフ光が非常に微弱な光でありその光をノイズと区別できる感度が必要とされる。5mm 位置分解能の理由として、角度分解能の立場から 5mm 以下であることが望ましい。1.5T 磁場耐性という要請は、Belle 検出器の説明の際に述べたとおり、超伝導ソレノイドによって検出器内には 1.5T の磁場が常にかかっているためである。

次に、読み出し回路への要求として

- 高利得・低雑音で動作するアンプ
- 10 万以上の多チャンネル読み出しに対応
- コンパクト化

が挙げられる。

A-RICH では、これらの要求を満たす光検出器 HAPD、読み出し回路 ASIC を採用し、各々研究開発を行ってきた。A-RICH を構成する HAPD, ASIC, Aerogel の特徴について次に述べる。

### 3.2.1 光検出器 HAPD

HAPD(Hybrid Avalanche Photo Detector) は浜松ホトニクス社と共同開発を行っているマルチアノード型光検出器である (図 3.4(a))。特徴として真空管部分と半導体検出器 APD とのハイブリッド構造で磁場中での動作が可能である。1 つの HAPD には 4 つの APD チップが搭載されており (図 3.4(b))、4.9 mm × 4.9 mm サイズのピクセルを 1 chip 36 ch, 全体で 144 ch 持ち、有効面積<sup>1</sup>は 64 % となっている。144 ch のアノードは光電面から見た場合図 3.10(b) のように配置しており、ステムピンとの対応は図 3.10(a) のようになっている。

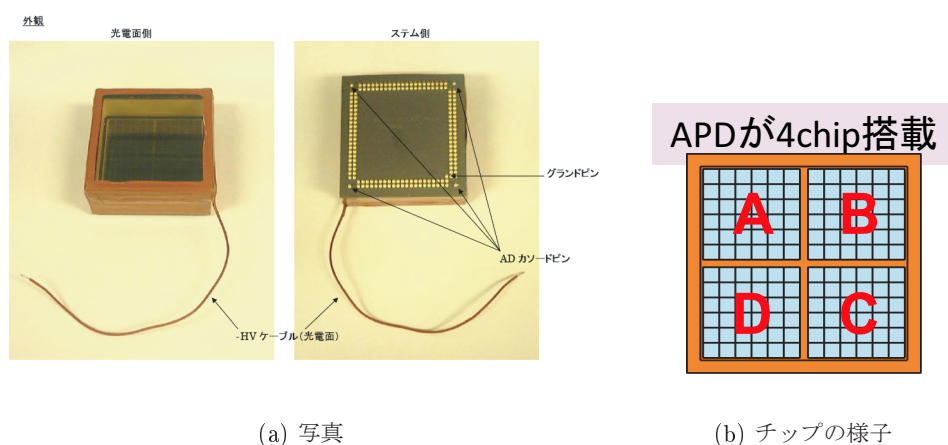


図 3.4: HAPD

HAPD の構造を図 3.5 に示す。HAPD に光が入射すると光電面で光電効果により光電子が放出され、光電面に印加された高電圧 (約 8 kV) によって光電子が加速され APD に打ち込まれる。APD に打ち込まれた光電子はエネルギーを落として停止する。この時、エネルギーによって約 3.6 eV 当たりの 1 対の電子-正孔対を生成する。約 1500 の電子-正孔対が生成され、この増幅を打ち込みゲインと呼ぶ。打ち込みゲインは  $\sim 10^3$  倍得られる。APD 内部で生成された電子-正孔対は APD に印加された逆バイアス電圧によってそれぞれ逆向きに移動する。その過程でアバランシェ領域を通過した際に、Si 原子の価電子帯から電子を励起させ、新たな電子-正孔対を生成していく。この時、1 つの電子によって生成される電子-正孔対の数 (増幅数) をアバランシェゲインと呼ぶ。また、アバランシェゲインは  $\sim 40$  倍得られる。この過程によって最終的な HAPD の増幅率 (ゲイン) は打ち込みゲイン  $\times$  ア

<sup>1</sup>HAPD の面積に対し光子を検出できる領域

バランシェゲインとなるので、 $10^4 \sim 10^5$  程度となる。HAPD は始めに電子の打ち込みで増幅するため、光電子増倍管と比べ信号の統計的な揺らぎは少なくなり、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。

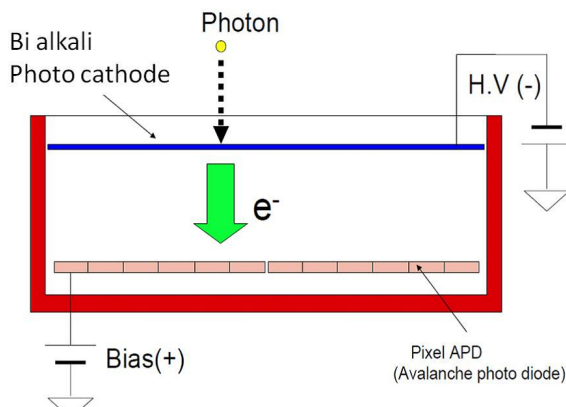


図 3.5: HAPD 原理 [16]

打ち込みゲインは光電面にかかる印加電圧、アバランシェゲインは APD チップにかかるバイアス電圧で独立に調節することができる。印加電圧はすべてのチャンネルに共通、バイアス電圧は各 APD チップに共通で、最大値は各々-8.5 kV, 350~400 V 程度<sup>2</sup>になっている。

ここで APD の構造と原理について記述する。HAPD に使用している APD はシリコンで構成されてるシリコン APD である。典型的な APD の構造を図 3.6 に示す。層構造は  $P^+$  層、P 層、N 層、 $N^-$  層となっていて、P 層と N 層の間の接合面とその周辺に空乏層が広がっている。さらに逆バイアス電圧を印加することで接合面付近に強い電場が形成されアバランシェ増幅領域を形成する。APD の動作機構を理解する上で基本となる物理過程は電荷キャリアの衝突電離によるなだれ増幅機構である。光電子が入射して励起した電子あるいは正孔は電場に引かれてドリフト運動をして電極へと向かってゆく。これらの電荷キャリアの大半は格子原子や不純物原子との衝突によってその運動エネルギーを失いながら運動するので大きな運動エネルギーを得るには至らないが電場が十分強いと一部の電荷キャリアは衝突して価電帯 (伝導帯) に束縛されている電子 (正孔) を伝導帯 (価電帯) に励起させるのに十分なエネルギーを得ることができる。衝突電離で生成された 2 次の電子・正

<sup>2</sup>同じサンプル内の各 APD チップ, またサンプルによって異なる



孔がさらに電場によって加速されてエネルギー・ギャップよりも大きな運動エネルギーを持たば次の衝突電離を引き起こすことになる。このような衝突電離の連鎖反応がアバランシェ増幅 (雪崩増幅) である。

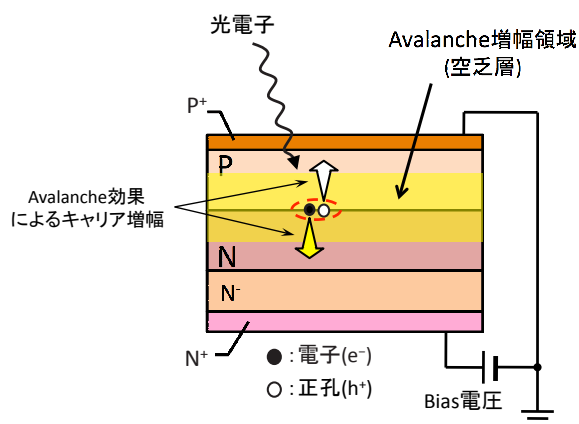


図 3.6: APD の構造

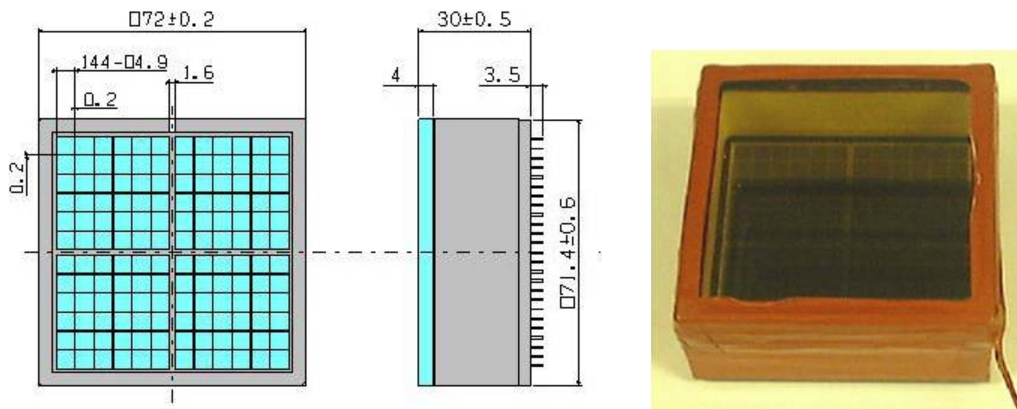
ここまで HAPD の原理と構造について説明してきた。

現在、(株) 浜松ホトニクスと協力して Aerogel-RICH 用マルチアノード型 HAPD の研究開発を行っている。使用を表 3.1、構造図を図 3.7(a)、外観を図 3.7(b) に示す。

外形は 73mm × 73mm のセラミック容器を用いており、入射窓は合成石英を使用している。入射窓にはバイアルカリ光電面が蒸着されており、現在はより高い量子効率を持つスーパーバイアルカリへの変更が進められている。

表 3.1: HAPD の仕様 [18]

項目	仕様	
大きさ	73mm × 73mm	
有感面積	65%	
入射窓	材質	合成石英
	厚み	4mm → 3mm
光電面	材質	バイアルカリ → スーパーバイアルカリ
	ピーク QE	~ 25% → ~ 35%
	最大印加電圧	8.5kV
打ち込みゲイン	~1700	
APD	chip 数	2×2
	逆 bias 電圧	300 ~ 400V
	Avalanche ゲイン	~50
	1pixel サイズ	4.9mm × 4.9mm
	pixel 数/chip	6 × 6
トータルゲイン	$10^4 \sim 10^5$	
読み出し数	144channel	



(a) HAPD の構造図

(b) HAPD の外観

図 3.7: HAPD の構造図と外観

サンプル SHP70 の場合、最大印加バイアス電圧は各チップごとに表 3.2 のようになり、印加電圧に対する打ち込みゲインの変化は図 3.8、バイアス電圧に対するアバランシェゲインの変化は図 3.9 のようになる<sup>3</sup>。打ち込みゲインとアバランシェゲインを掛け合わせた値が HAPD のゲインである。

表 3.2: SHP70 の最大印加バイアス電圧 [8]

chip	Max voltage of bias(V)
A	331
B	331
C	337
D	343

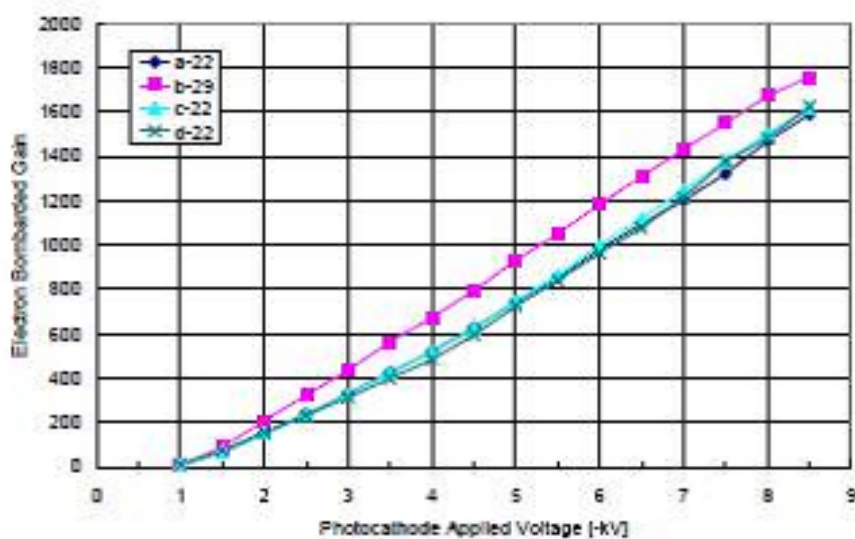
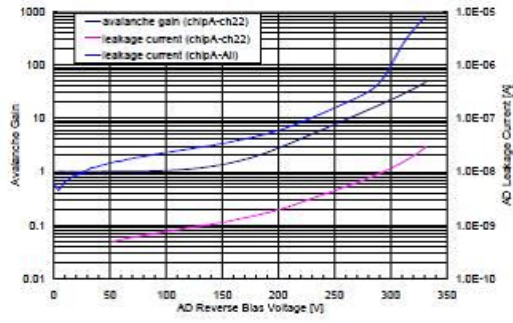
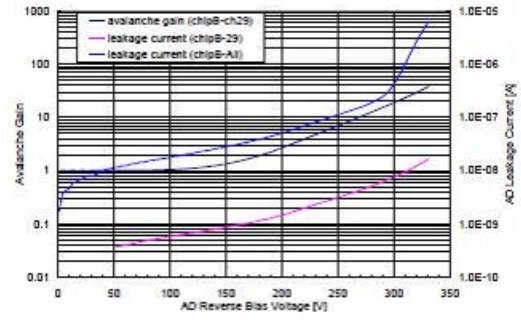


図 3.8: HV と打ち込みゲインの関係 [8]

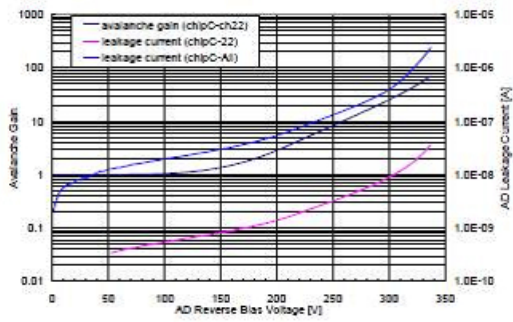
<sup>3</sup>浜松ホトニクスからのデータシートからの出典。性能試験ではこのデータを予想値とし実測値と比較した。



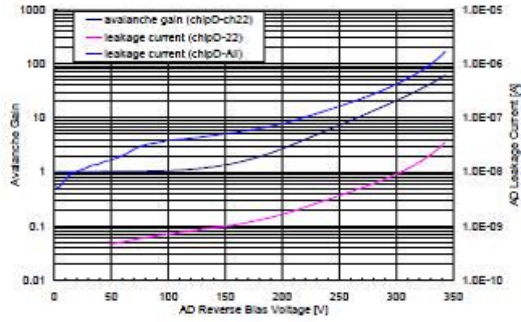
(a) chip A



(b) chip B



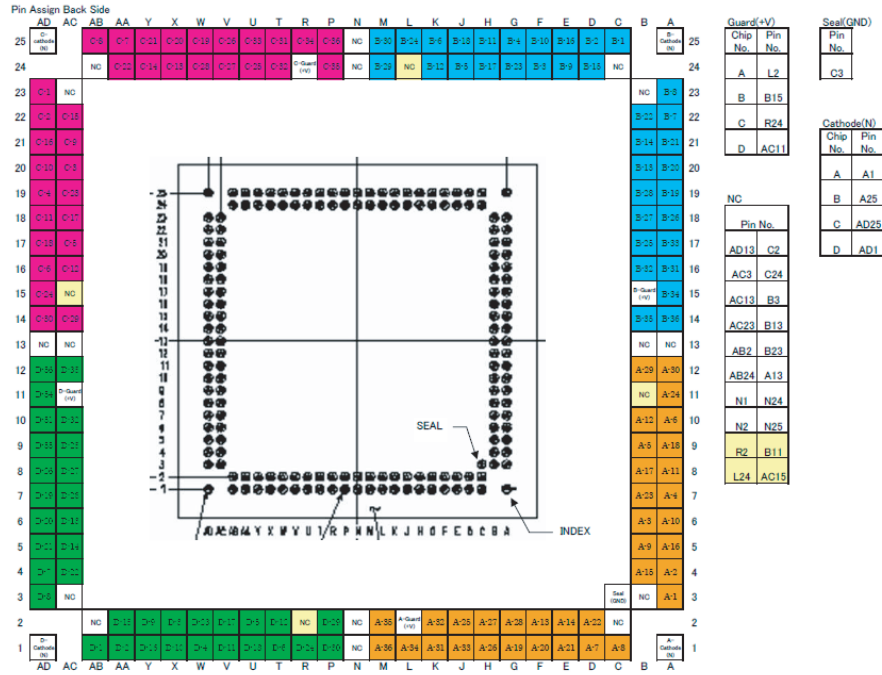
(c) chip C



(d) chip D

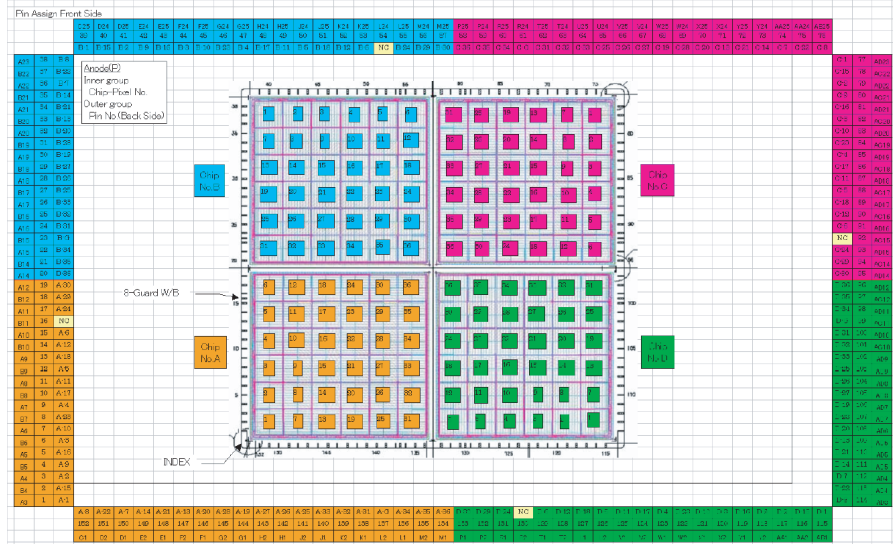
図 3.9: 各 chip のバイアス電圧とアバランシェゲインの関係 [8]

STEMピン配置



(a) ピン配置

ピクセル配置 (光電面側より)



(b) ピクセル配置

図 3.10: HAPD のピン配置とピクセル配置 [8]

### 3.2.2 読み出し回路用 ASIC

HAPD の読み出し回路として設計され、高利得・低ノイズのアンプ機能を持ち、高速読み出しに対応している。これは HAPD の最終増幅率が  $\mathcal{O}(10^4)$  と、光検出器としては比較的低いことと 1 光子検出性能を向上させるためである。また、EACC の空間設置制約は奥行き 30 cm であり、読み出し回路にはコンパクトであることが要求される。また、最終的な検出器 (HAPD) の設置台数は 600 台程度であり、10 万チャンネル程度の同時読み出しが要求されるため、設計された読み出し回路 ASIC は電子回路の構成の簡素化と高集積化が求められる。HAPD 専用読み出し回路の構成図を図 3.11(a) に示す。図 3.11(b) は第 1 バージョン「SA01」と FPGA を搭載した読み出しボードである。

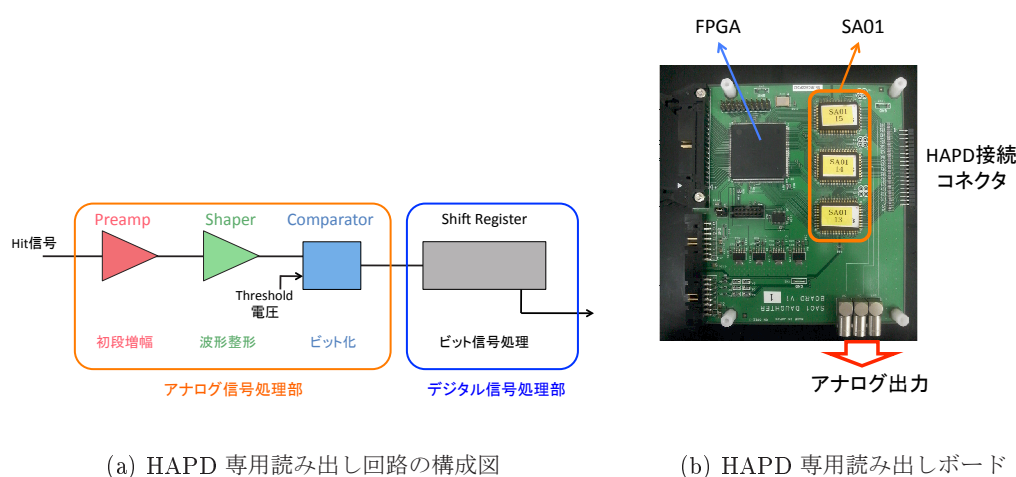


図 3.11: HAPD 専用読み出し回路

図 3.11(a) の前半にある Preamp, Shaper, Comparator 部を ASIC<sup>4</sup>によって開発している。ASIC は汎用 IC を組み合わせたような回路と異なり、個別に設計を行ない 1 つの IC とすることで回路規模を小さくできるので、高集積化が可能で高速動作に適している。HAPD で出力されたアナログ信号が ASIC に入力されると前段増幅器 (Preamp)、整形器 (Shaper)、比較器 (Comparator) を通して整形・増幅される。Preamp では増幅率の調整、Shaper では波形立ち上がり時間である shaping time の調整など、HAPD からの微弱な光子検出信号を判別しやすいように調整するようになっている。この 3 つまではアナログ信号を扱う

<sup>4</sup> Application Specific Integrated Circuit: 特定用途向け IC

が、Comparator では設定されたスレッシュホールドに対しアナログ信号が上回った場合にデジタル化された信号が出力され、最終的に出力は二値化される。Comparator に与えるスレッシュホールドは全チャンネル共通で、各チャンネルのベースラインのオフセット値は個別に調節可能であるため実効的に各チャンネルのスレッシュホールドを設定できる。

図 3.11(b) の後半にある、Shift Register は光子検出有無の判別から得られたビット情報がある期間保持し、外部トリガーによって読み出せるようになっている。このデジタル信号処理を行なう回路を FPGA<sup>5</sup>によって構築するよう開発を進めている。FPGA はプログラムによって回路構成を変更可能な論理回路素子群からなる特殊な IC であるので、Belle II の DAQ システムにも柔軟に対応できるようデジタル信号処理部を FPGA によって構築している。また、AISC への制御信号生成などもこの FPGA 上で構成している。

現在、ASIC については基礎研究を終え<sup>6</sup>、最終版に向けた開発を行っていて、第 3 バージョンの設計まで進められている。

---

<sup>5</sup>Field Programmable Gate Array

<sup>6</sup>この時期に作られた ASIC は S シリーズとよばれるが、その開発を終了して SA シリーズ開発へと移行した。

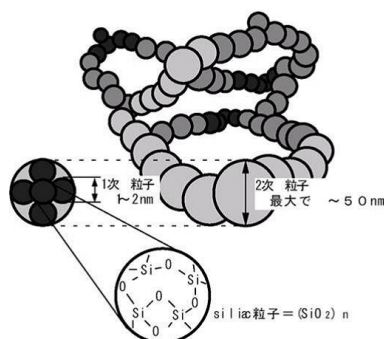
### 3.2.3 Silica Aerogel

Aerogelは Belle 検出器の ACC の輻射体として使われているとともに、A-RICH の輻射体としても使用する。ACCは2.5.3章に記したように発光有無で $K/\pi$ 識別を行い、 $n=1.01\sim 1.03$ を使用している。A-RICH 検出器では $\pi$ と $K$ のチェレンコフ光の放射角で粒子識別を行うため、どちらの粒子もチェレンコフ光を発光するように使用される屈折率は $n=1.04$ 程度を基準としている。

Aerogelは $\text{SiO}_2$ を主成分とするゲル状の物質を乾燥することで作られる多孔質の個体で、その体積の90%以上は空気で占められている。原料となるゲル状の物質はシリカ粒子が鎖状に結合して絡み合った3次元の多孔質ゲルである。実際のsilica-Aerogelの外観の様子は図3.12(a)である。この構造(図3.12(b))により内部に多くの空気を含み、乾燥させ固体になった時に異常なほどの低密度が実現されている。[13]



(a) Aerogel



(b) シリカエアロゲルの構造

図 3.12: Aerogel とその構造 [13]



### 3.3 期待される A-RICH 検出器の性能

#### 3.3.1 チェレンコフ角度分解能

チェレンコフ光検出の角度分解能 ( $\sigma_\theta$ ) は、光子の発光点と検出器までの距離と検出器の分解能で決まる。前者の効果による角度分解能  $\sigma_{emp}$  は Aerogel の厚さを  $d$ 、チェレンコフ光の角度を  $\theta_c$ 、Aerogel から HAPD までの距離を  $L$  とすると、

$$\sigma_{emp} = \frac{d \sin \theta_c \cos \theta_c}{L\sqrt{12}} \quad (3.4)$$

となり、一方後者の効果による  $\sigma_{pix}$  はピクセルサイズを  $a$  とすると、

$$\sigma_{pix} = \frac{a \cos \theta_c^2}{L\sqrt{12}} \quad (3.5)$$

となる。二つの効果から角度分解能  $\sigma_{\theta_c}$  は

$$\sigma_{\theta_c} = \sigma_{emp} + \sigma_{pix} \quad (3.6)$$

となる。

Aerogel の厚さが 20 mm、Aerogel と HAPD までの距離を 200 mm とした時、HAPD のピクセルサイズは 4.9 mm  $\times$  4.9 mm なので  $\sigma_\theta$  は 10 mrad 程度となる。[2]

#### 3.3.2 K/ $\pi$ 粒子識別能力

A-RICH の粒子識別能力を  $S$  として、1トラック当たりの角度分解能  $\sigma_\pi$ 、 $\sigma_K$  を用いて以下のように  $S$  を定義する。

$$S = \frac{\theta_\pi \theta_K}{(\sigma_\pi + \sigma_K)/2} \quad (3.7)$$

$\theta_\pi$  及び  $\theta_K$  は  $\pi$  及び  $K$  中間子によるチェレンコフ角である。1トラック当たりの角度分解能は、1光子当たりの角度分解能  $\sigma_\pi^{1pe}$ 、 $\sigma_K^{1pe}$  と検出光子数  $N_{pe}$  を用いて近似的に

$$\sigma_K = \frac{\sigma_K^{1pe}}{\sqrt{N_{pe}}}, \sigma_\pi = \frac{\sigma_\pi^{1pe}}{\sqrt{N_{pe}}} \quad (3.8)$$

のように表される。A-RICH 検出器の性能を向上させるには1光子当たりの角度分解能と検出光子数から決定される1トラック当たりの角度分解能の改善を行う必要がある。

## 第4章 HAPD 性能試験と結果

2009年11月に行われたビーム照射実験では Belle 検出器内に設置することを想定して A-RICH プロトタイプを製作し、HAPD と ASIC の統合試験を行った。またビーム照射実験で用いた HAPD 6 サンプルの性能試験を行った。性能試験では各 APD chip のノイズレベル測定と LED 照射による単光子検出、およびゲイン測定、1,2 次元スキャンを行った。

### 4.1 実験準備

セッティングは図 4.1、図 4.2 に示すように、HAPD・プリアンプ・LED を暗箱におさめ、HAPD の信号はプリアンプ、シェーパーで増幅・整形され Pocket MCA(Multi Channel Analyzer) でその信号のデジタル情報を得る。その他、HAPD に高電圧、ガード・バイアス電圧を供給するための電源装置、出力信号を確認するためのオシロスコープ、LED を光らせるためのファンクションジェネレーター、データを取得するためのパソコンを使用している。実験装置の写真と詳細を図 4.3, 図 4.4 と表 4.1 に示す。

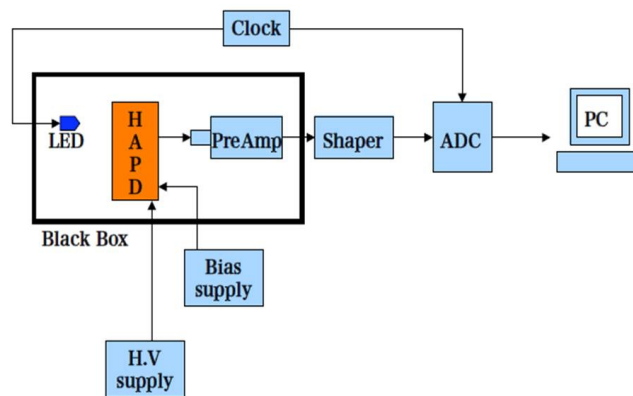


図 4.1: 実験セットアップ

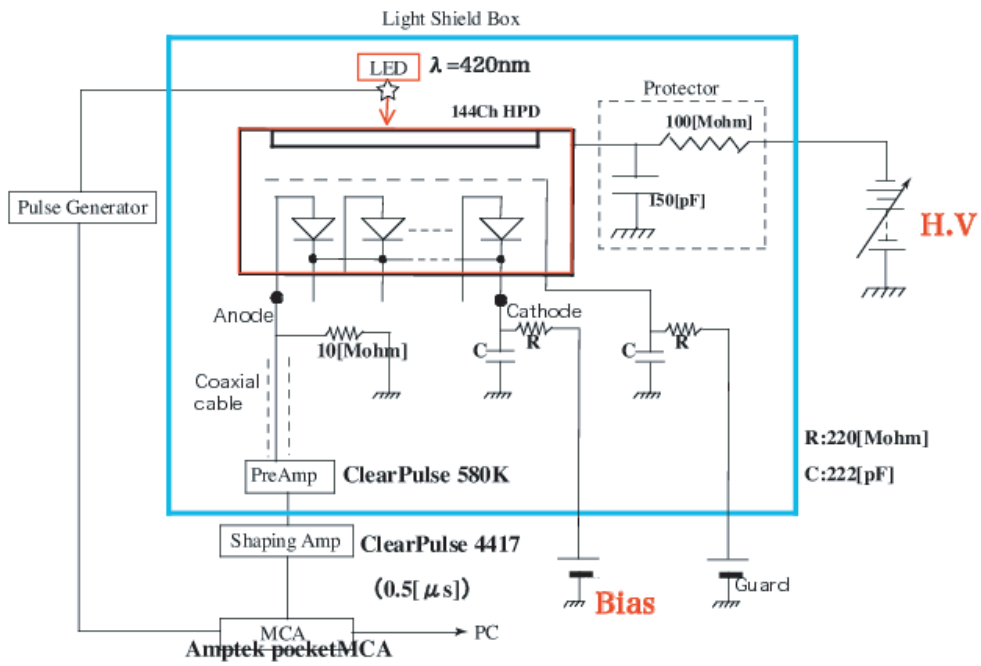
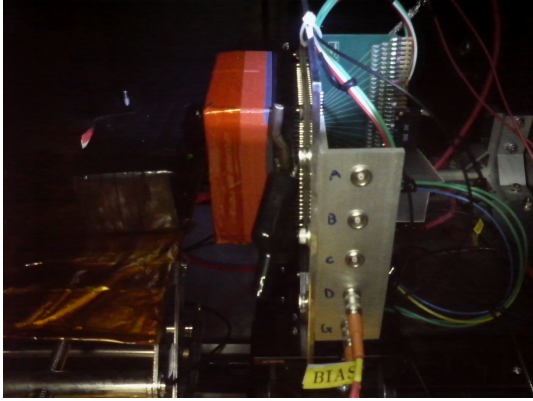
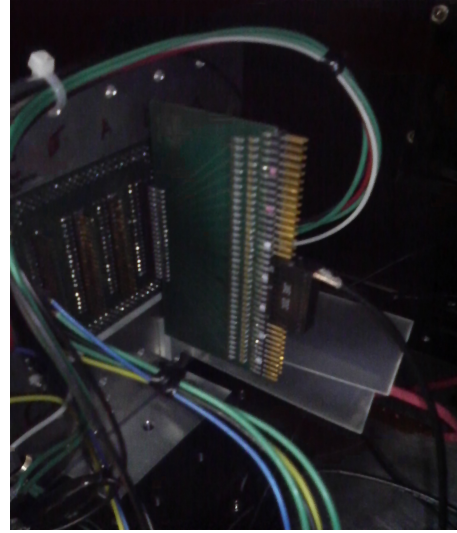


図 4.2: 回路図 [16]



(a) 暗箱中の配置



(b) 1ch 読み出しボード



(c) 使用したプリアンプ



(d) 使用した MCA

図 4.3: 性能試験の様子

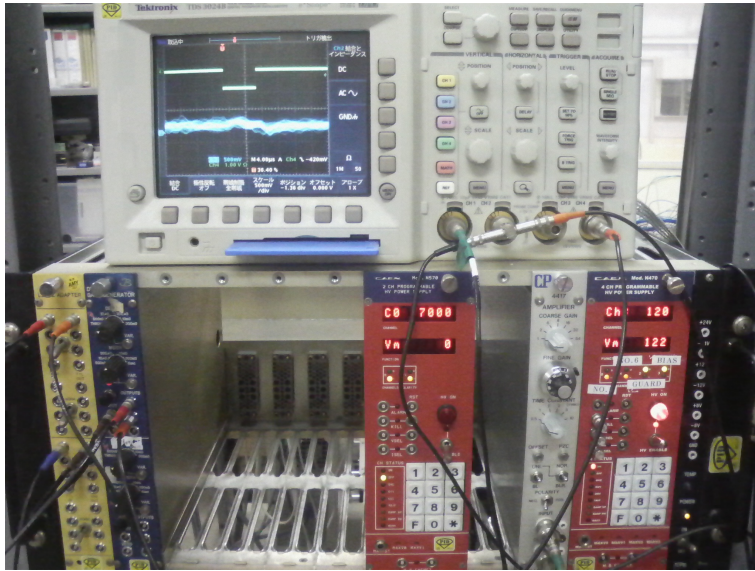


図 4.4: 使用したエレクトロニクス類

表 4.1: 使用したエレクトロニクス類

HV	CAEN Mod.N570
ガード・バイアス電源	2CH PROGRAMMABLE POWER SUPPLY CAEN Mod.N470
プリアンプ	4CH PROGRAMMABLE POWER SUPPLY Clear Pulse 580K
シェーパー	Clear Pulse 4417
オシロスコープ	Tektronix TDS 3014B
ファンクションジェネレーター	WAVE FACTORY 30MHz MULTIFUNCTION GENERATOR WF1973
LED	420nm
ADC	Amptek Pocket MCA

HAPD の測定時には以下の点に注意する。

- 測定時は光漏れに注意し、暗幕をかけて遮光して行う。
- 遮光された状態で各電圧を印加させる。

- 必ずガード電圧を 200 V or 220 V 印加してから、バイアス電圧, HV と順にかけてく。(電圧を落とす際はその逆を行う。)
- バイアス電圧は各 chip の上限値以上かけてはならない。
- 高電圧は-8.5 kV まで印加可能であるが、初回時は低い電圧から徐々にかけてオシロスコープで波形の様子を見る。

プリアンプで増幅された HAPD の信号は MCA でその波高を測定する。波高に対し、どのようなデジタル値を返すのか(換算値)を測定してから、各試験を行った。換算値の測定はパルスジェネレーターからの信号をプリアンプのテストパルス入力部に入れ、増幅された信号を MCA の「INPUT」に、ファンクションジェネレーターの同期信号を「GATE」に入れる。この時プリアンプで増幅された信号と「GATE」に入力した信号のタイミングがあっていることを確認する。

プリアンプへの入力には正極性のパルスで波高は 1 mV~50 mV まで変化させる。これは HAPD で得られる電荷の大きさを考えて測定の最大値を決定した。HAPD のゲインは  $10^5$  程度で単光子を検出した場合およそ  $10^5$  electron の電荷が得られ、プリアンプに入力される電荷  $Q$  [C] は電子数を  $N$  とし、式 4.1 で与えられる。

$$Q = N_e \times e = 1.6 \times 10^{-14} \quad (4.1)$$

プリアンプのテストパルス入力部には 1 pF のコンデンサが取り付けられているので、プリアンプに入力される最大の電荷  $Q$  [C] は式 4.1 で与えられるとすると、コンデンサの容量  $C$  [F] から入力するテストパルスの最大波高  $V$  [V] が式 4.2 で求められる。

$$V = \frac{Q}{C} = 1.6 \times 10^{-2} [V] \quad (4.2)$$

## 4.2 性能測定

### 4.2.1 MCA デジタル数値から電子数への換算値

プリアンプの Test 入力パルス部に波高を 1 mV ~ 50 mV まで変化させた信号を入力し、測定を行った。図 4.5 は配線図である。

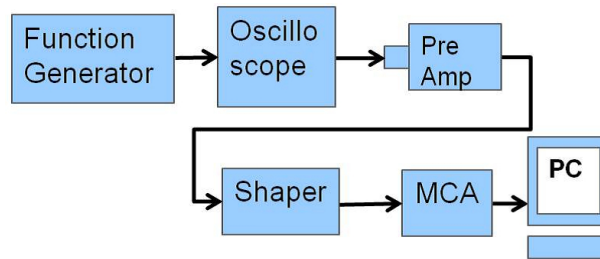


図 4.5: 換算値測定 of 配線図

その応答の結果を図 4.6 に示す。

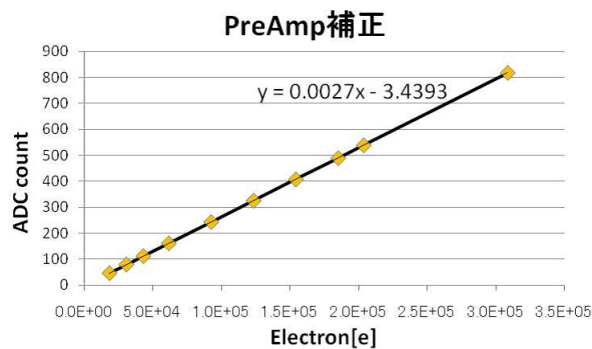


図 4.6: 換算値測定の結果

横軸はプリアンプに入力された電子数<sup>1</sup>、縦軸は MCA のデジタル数値である。リニアリティが確かめられ、傾きから「MCA カウント → 電子数」の換算値が 0.0027 count/electron と求められた。ノイズレベル測定、単光子検出、ゲインの算出ではこの換算値を用い、結果の評価を行った。ただし、試験した一部の HAPD のサンプル、日時によって使用したプリアンプが異なるので対応を表 4.2 にまとめる。<sup>2</sup>

表 4.2: 換算値対応表

HAPD ID (SHP00XX)	Factor[count/electron]
70(2009 年 5 月測定)	0.00250
70(2010 年 10 月測定),77,117,118,120	0.00266
113	0.00525

<sup>1</sup>入力波高を電荷にし、そこから電子数を求める。式 4.1, 4.2 での計算を逆算すれば良い。

<sup>2</sup>換算値が異なる理由として、MCA のフルスケール及びゲインの設定が異なるためでもある。

## 4.2.2 ノイズレベル

ノイズレベル測定は、バイアス電圧を印加していった時のノイズの大きさ・振舞い方を知るために行う。バイアス電圧 0 V~ 最大値<sup>3</sup>までを変化させ、出力信号の ADC 分布を測定する。この時 HV と LED を off にする。まずはバイアス 50V 以上で APD に空乏層が形成されるため、ノイズレベルが減少することをオシロスコープで確認したのちに、バイアス電圧を変化させ ADC 分布をとる。ADC 分布の Sigma をノイズレベルとする。図 4.7 の上段は、オシロスコープで観察された波形の様子であり、下段は得られた ADC 分布である。

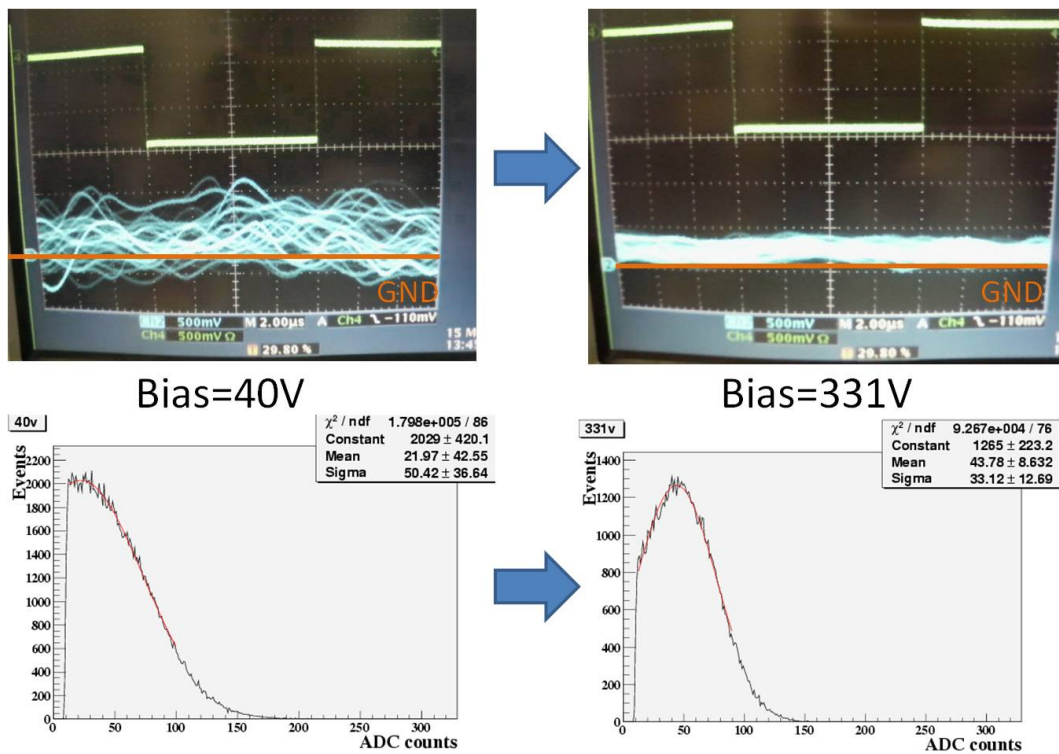


図 4.7: ノイズレベル測定

## 4.2.3 単光子検出とゲイン

HAPD の条件にある単光子検出が来ているかどうか、そして Total gain  $\cdot$  S/N 比はどのくらいかを知るために行う。ガード電圧、バイアス電圧を印加後、高電圧を印加する。この時、バイアス電圧は最大値、高電圧は-8.5kV と-7kV を印加した場合でそれぞれ測定を

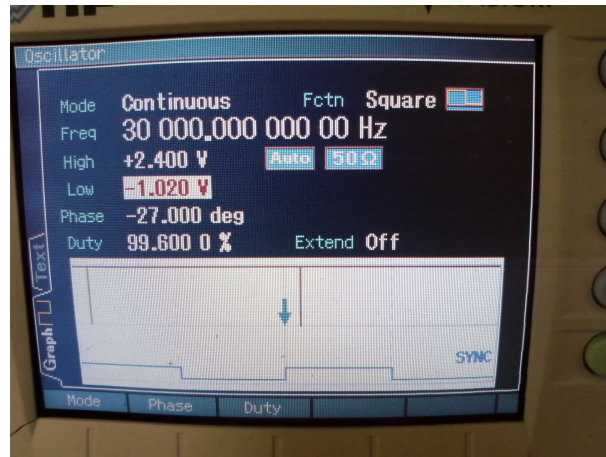
<sup>3</sup>最大値は HAPD のサンプルまたは APD チップで異なるが、だいたい 350 V~400V である。



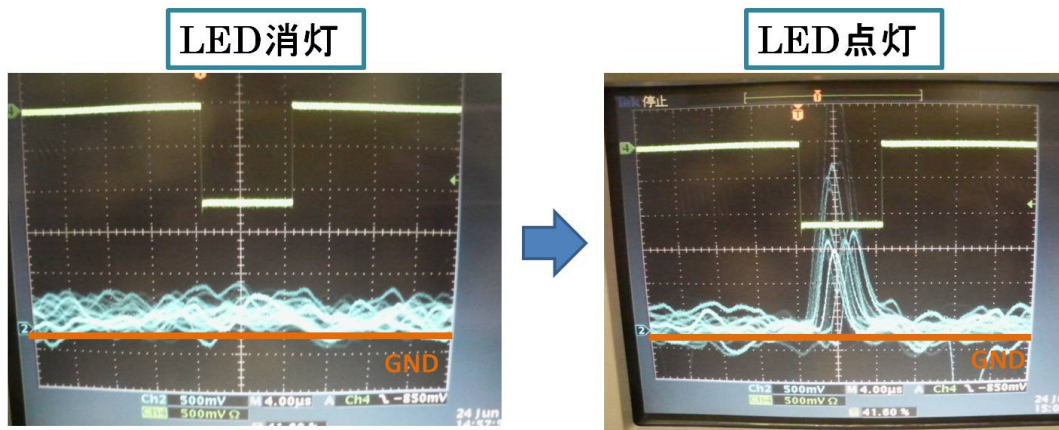
行った。高電圧に関しては一部上記以外の電圧で測定している<sup>4</sup>。高電圧まで印加後、オシロスコープで信号を観察しながら、LEDを光らせて応答確認する。そして、2光電子が検出できるように光量を調節してADC分布をとる。LEDはファンクションジェネレーターで以下のようなパルスを送り光らせた。ただし、測定するHAPD,chipごとに調整が必要な場合もある。図4.8(a)は実際にLEDへ入力したパルスの設定値、図4.8(b)はLEDの消灯・点灯時のオシロスコープで観察した波形の様子である。

---

<sup>4</sup>高電圧印加時のオシロスコープで観察したノイズレベルで判断して実験時に印加電圧を決めている。



(a) 入力パルス



(b) LED の点灯・消灯による出力信号の変化

図 4.8: 単光子検出

#### 4.2.4 1次元, 2次元スキャン

HAPD の位置検出応答性について評価を行う。

装置全体の様子は図 4.9、セッティングは図 4.10 に示すように、HAPD・ASIC・2次元可動ステージを暗箱におさめ、HAPD の信号は ASIC によって読みだされる。その他、HAPD に高電圧、ガード・バイアス電圧を供給するための電源装置、出力信号を確認するためのオ

シロスコープ、レーザー発振装置、ASICに電源を供給するための供給ボード、測定やデータを取得するためのパソコンを使用している。実験装置の写真と詳細を図 4.11, 図 4.12 と表 4.3 に示す。



図 4.9: 2次元スキャン装置のセットアップ

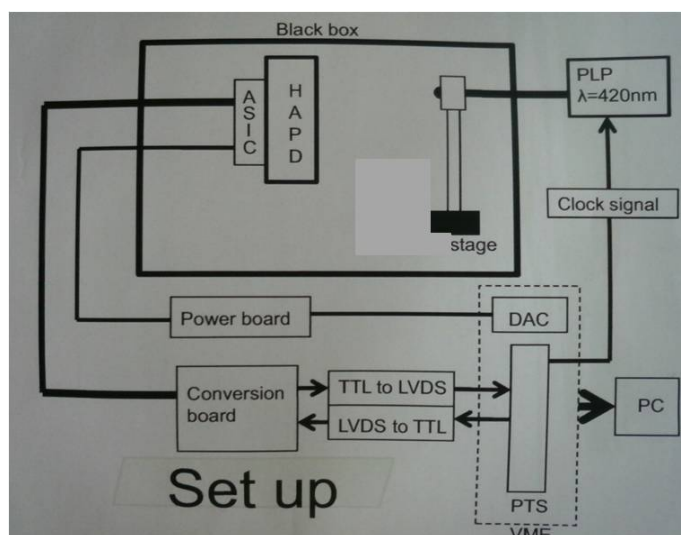
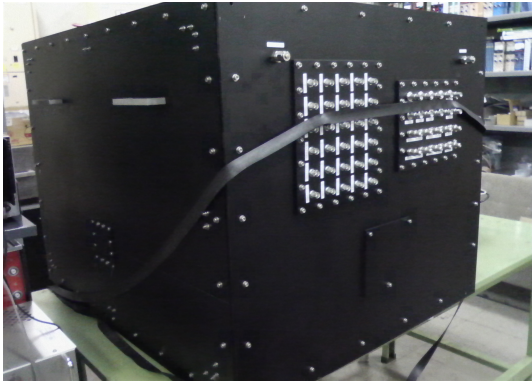
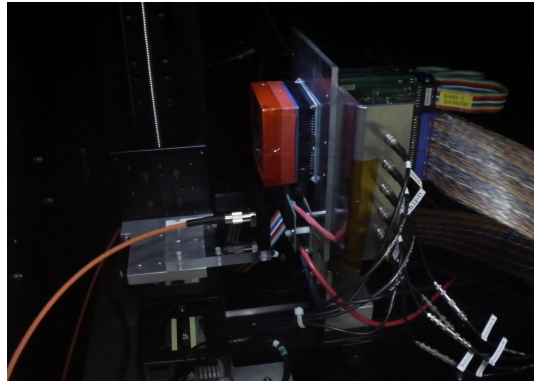


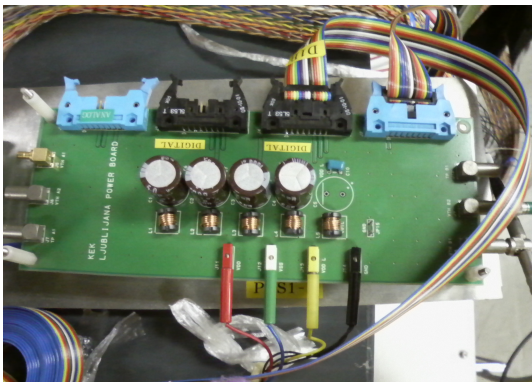
図 4.10: 回路図



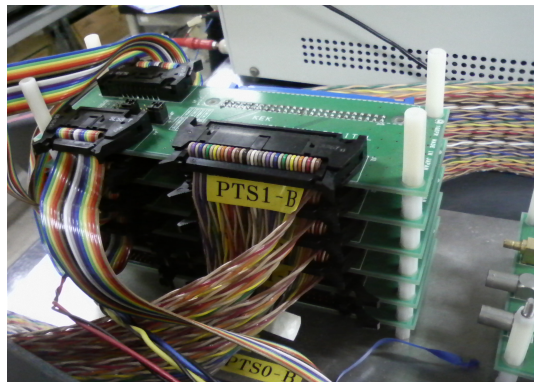
(a) 暗箱



(b) 暗箱中の様子



(c) ASIC 用電源供給ボード



(d) コンバージョンボード



(e) ASIC



(f) レーザー発振装置

図 4.11: 使用した装置



図 4.12: 使用したエレクトロニクス類

表 4.3: 使用したエレクトロニクス類

HV	CAEN Mod.N570 2CH PROGRAMMABLE POWER SUPPLY
ガード電源	KENWOOD REGULATED DC POWER SUPPLY PA250-0.42A
バイアス電源	CAEN Mod.N470 4CH PROGRAMMABLE POWER SUPPLY
ASIC 供給電源	KENWOOD REGULATED DC POWER SUPPLY PWR18-1.8Q
TTL ⇔ LVDS	CONVERTER TYPEK GNN-180K,190K FANOUT TYPEK GNN-380K
オシロスコープ	Tektronix TDS 3034B
レーザー発振装置	HAMAMATSU C10196 PICOSECOND LIGHT PULSER
2次元可動ステージ	SIGMA KOKI SHOT-202 STAGE CONTROLLER

可動ステージにはレーザー発振装置から繋がれたファイバーを取り付け、移動間隔0.4mmで移動させながら HAPD 全面に光を当てていく。バイアス電圧はアバランシェゲインが  $\times 40$  の値を使用し、HV は-7kV を印加する。2次元スキャンでは  $178 \times 178$  点を測定し、1次元スキャンでは y 軸を一定に、x 軸を移動させて 1 行分の測定を行う。

1・2次元スキャン測定で用いられている HAPD のチャンネル配置を図 4.13 に示す。

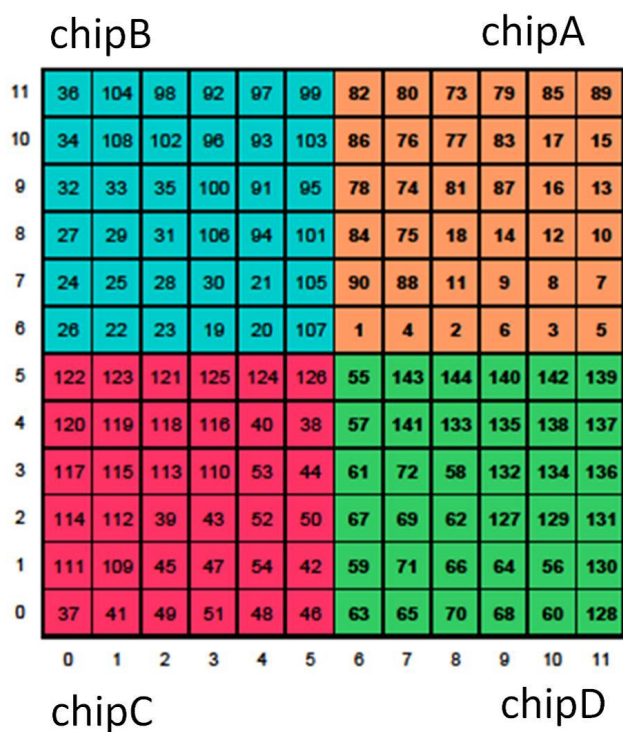


図 4.13: HAPD のチャンネル配置

## 4.3 結果

### 4.3.1 1 サンプルの性能結果

HAPD 全サンプルのうち、一例として SHP70 の測定結果を図 4.14 に示す。ノイズレベルと LED による単光子検出の結果に関して述べる。また、SHP70 については照射実験の前後で性能測定を行ったのでその結果を 4.3.3 章で述べる。

各 APD チップの各 1 チャンネル<sup>5</sup>、計 4 チャンネルを試験したところバイアス電圧に対するノイズの振る舞いが図 4.14(a) のように得られた。すべての APD チップは 50 V 付近で空乏層形成によりノイズレベルの減少が確認でき、振る舞いは各チップ同じであった。300 V 付近からノイズレベルが増大しているがこれはリーク電流が増大するためである。

ノイズレベル測定後、同様のチャンネルに対して単光子検出・ゲイン測定を行った。代表例として chip A に高電圧 -8.5 kV、バイアス電圧 331 V を印加した時の波高分布を図 4.14(b) <sup>6</sup> に示す。横軸は電子数、縦軸はイベント数である。1 光子、2 光子とがはっきり分離していることがわかる。chipA についてゲインと S/N 比を求めると、1 光子と 2 光子のピークの差からゲインは  $7.26 \times 10^4$  (式 4.4) となり、

$$Mean(2pe) - Mean(1pe) = (1.43 \times 10^5) - (0.70 \times 10^5) \quad (4.3)$$

$$= 7.26 \times 10^4 \quad (4.4)$$

S/N 比は 9.61 (式 4.5) とノイズとの分離が良いことがわかった。

$$\frac{Mean(2pe) - Mean(1pe)}{\sigma_{pedestal}} = \frac{(1.43 \times 10^5) - (0.70 \times 10^5)}{7549} = 9.61 \quad (4.5)$$

1次元・2次元スキンの結果は図 4.15 のように得られた。2次元スキンの x,y 軸はレーザーの照射位置 [mm] を表し、色合いはレーザーの照射位置での HAPD のヒットカウントを表している。図 4.15(a) でプロットされているのは、全ピクセルでのヒットカウントの重ね合わせである。ヒットカウントがないピクセルは HAPD の dead channel か ASIC の dead channel であり、HAPD の位置検出応答性が測定された。一様性に関しては chip B,C の端で高くなっているが、他部分はほぼ同様であることが確認できた。また、格子状に見える緑色の線はピクセル間の境界部分に当たるためヒット数が低くなっていると思われる。外側付近のピクセルでは光電子が正しい位置に入射せずに 1 つ内側のピクセルに入ってし

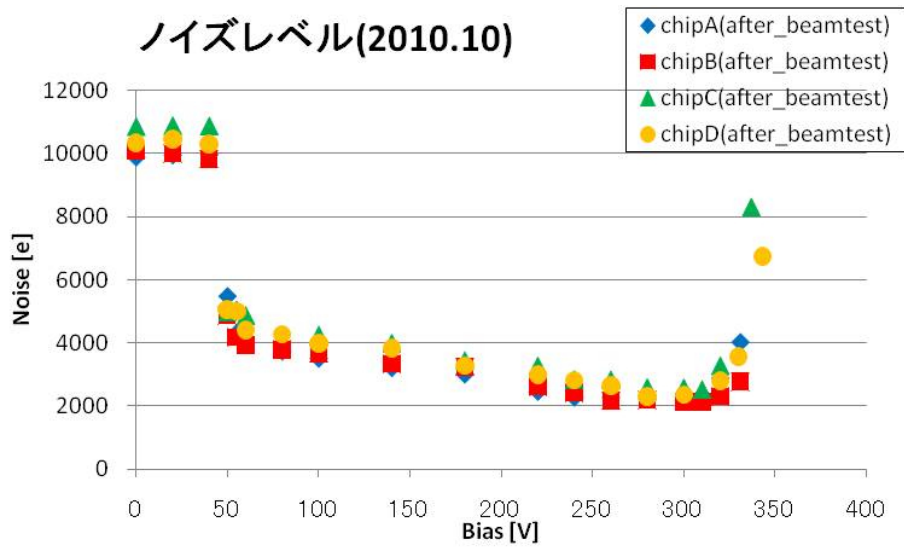
<sup>5</sup>測定したチャンネルは A,C,D chip では 22ch、B chip では 29ch であった。

<sup>6</sup>ピークの裾にフラットな分布は実験のセッティングによるエレクトロニクスまたは LED によるノイズ分布であろうと考えられる。

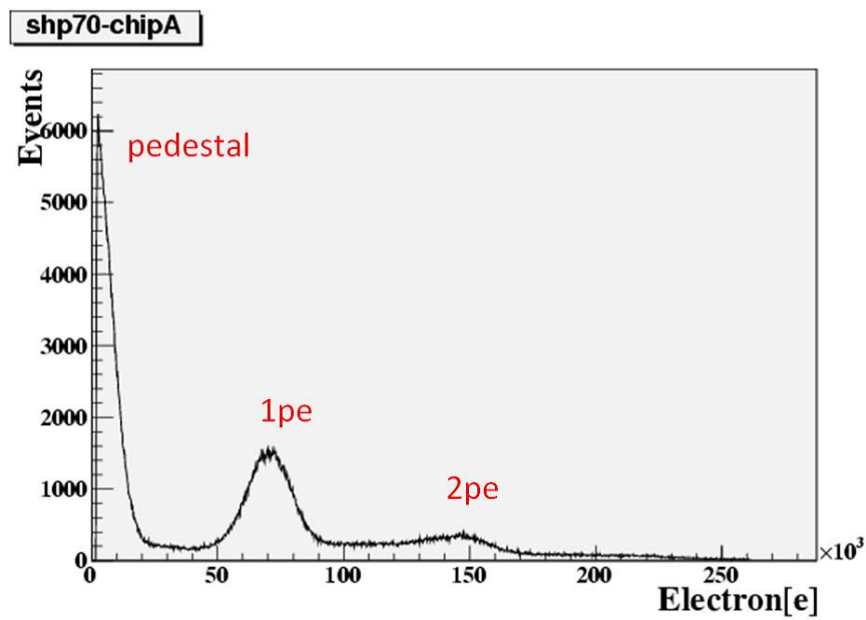
まっている。その結果、本来のピクセルサイズと異なった分布をとり、ピクセル間の境界も見られなくなっていることが分かり、位置分解能5mmというのが満たされていない。この原因として HAPD 内の電場の歪みが考えられている。これについては、図 4.15 の後に述べる。

より詳しく分布をみる為に1次元スキャンを行った。1次元スキャンのx軸はレーザーを入射させた位置 [mm] であり、y軸はその位置でのヒットカウントである。図 4.15(b) では下から6行目を測定した結果で、下段はy軸を対数にしたものである。1行分の12ピクセルの結果を重ねて表示させている。中心付近ではピクセル同士の分離が出来ており、5mm位置分解能が達成されていることが分かった。しかし、端のピクセルは2次元スキャンでも確認されたように本来のピクセルサイズと異なる分布をとることが分かった。SHP70に関しては端のピクセルの有効範囲が10mmあるように見えるが、これは端から2番目のピクセルに入射した分布を表していて、一番端のピクセルにはヒットがないことを示している。この原因も電場の歪みにより隣のピクセルに光電子が入射したためだと考えられる。また入射位置80~90mmの間にポコッと穴があいたような分布になっているが、これはdead channelであり、2次元スキャン結果にも見られる。



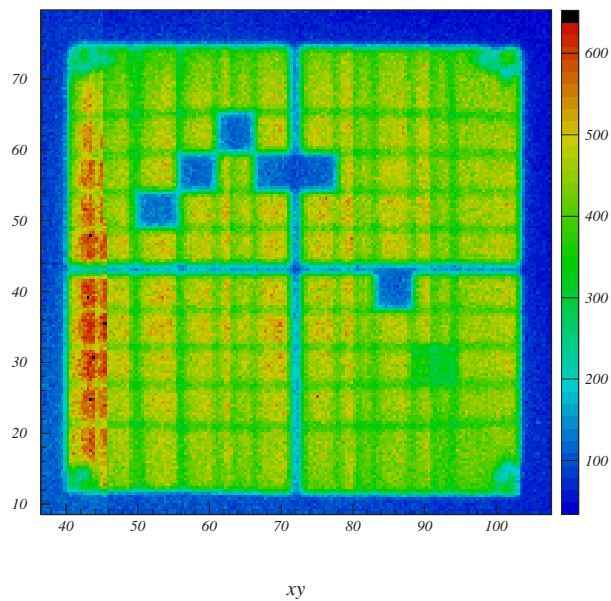


(a) ノイズレベル

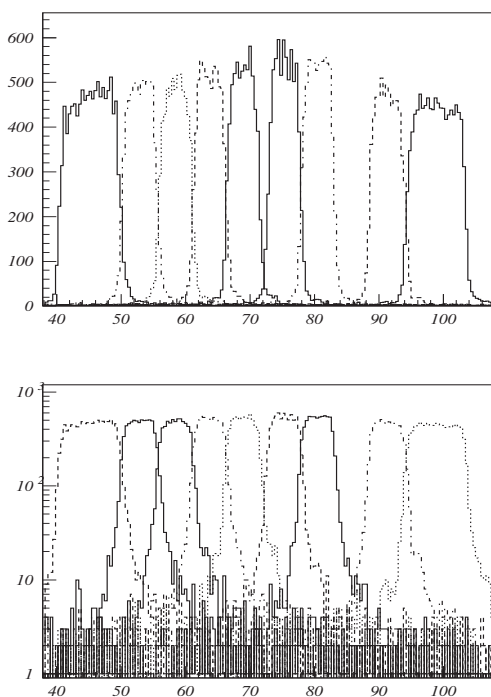


(b) 単光子検出 (chip A 22ch)

図 4.14: SHP70 の性能試験結果



(a) SHP70 の 2 次元スキャン



(b) 1 次元スキャン (6 行目)

図 4.15: SHP70 のスキャン結果

- 側管による電場の歪み

1,2次元スキャンにより側管付近のピクセルが歪んでしまう原因として、電場の歪みが考えられている。図 4.16 に示すように、HAPD の入射窓であるガラスと側管に用いられているセラミックを接合するために金属を挟んでいる。しかし、この構造では光電面に高電圧を印加したときに金属部分にも同じ高電圧が印加されてしまうことになる。この結果、真空管内部の等電位面は光電面に平行ではなく、端では側管に沿って歪むことになる。このため測定結果にあるように側管付近では光電子が HAPD 中心に向かって加速され、本来とは異なるピクセルに入射することになる。この問題は磁場耐性試験によって磁場内で改善されることが確認されている。HAPD を使用する環境では、磁場は電場に対して垂直にかかることになる。その結果、側管付近で曲げられた光電子は磁場に巻き付き、本来のピクセルに入射し、5mm の位置分解能を有することが分かっている。[18]

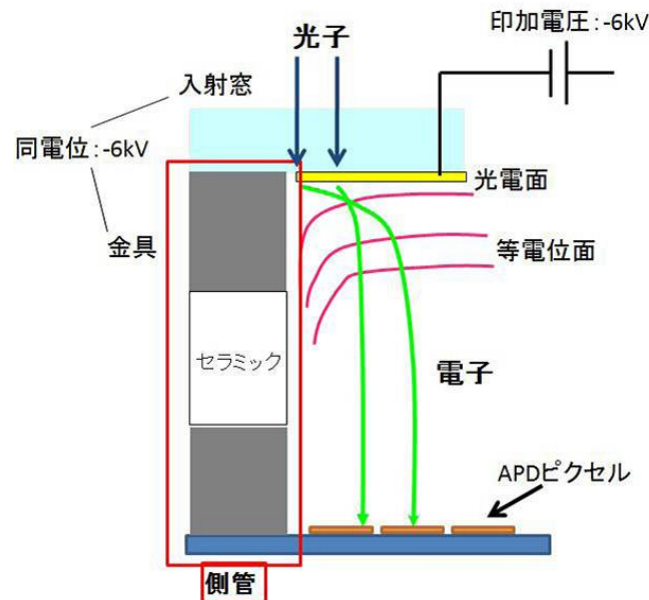
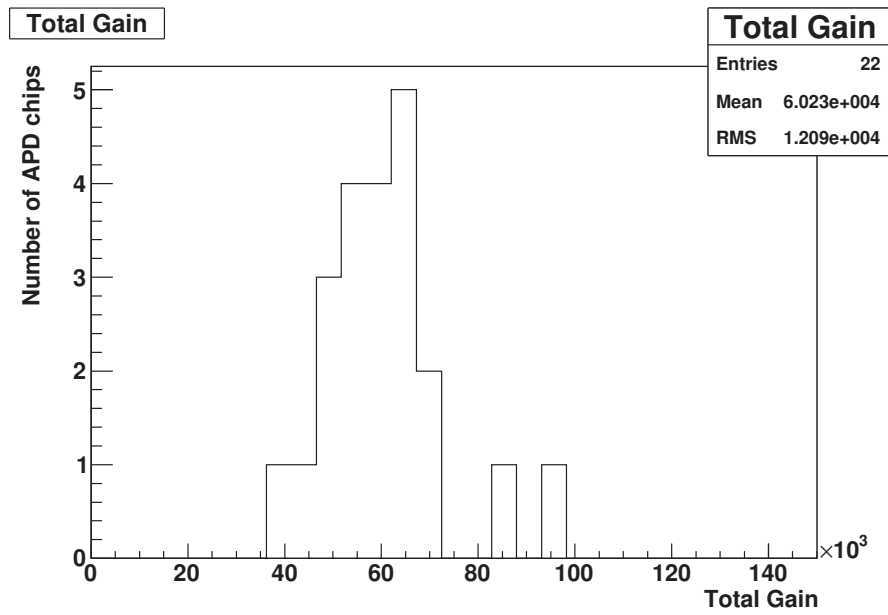


図 4.16: 側管による電場のゆがみ

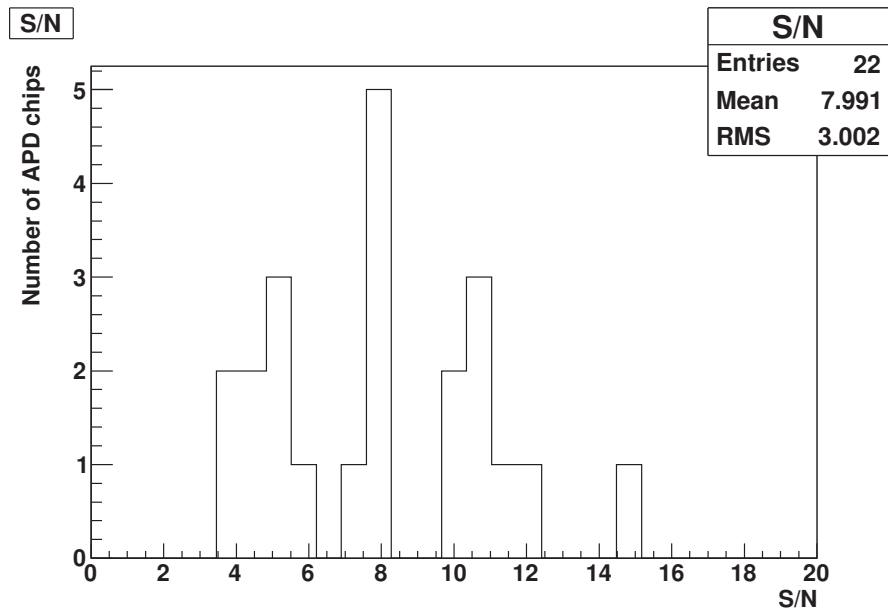
### 4.3.2 ビーム照射実験で使用したサンプル

ビーム照射実験用で使用された 6 サンプルの測定を行った。この性能試験から得られた 6 サンプルのゲインを図 4.17(a)、S/N 比を図 4.17(b) に示す。ゲインは生産時の仕様通り  $1.5 \times 10^4$  以上得られ平均は  $6.02 \times 10^4$ 、S/N 比の平均は 7.99 となった。分布がばらついているのは、APD チップやサンプルの個性が強く出ているためであり、同じ性能を持つ HAPD の製造工程が確立されてないであろうと考えられる。他の理由として、6 サンプルの最大ゲインをヒストグラムにしたため、ばらつきが出てしまったとも考えられる。また、サンプルのノイズレベルにより印加電圧を調節しているためゲインの結果が異なっているためである。そしてチャンネル・サンプルによりアバランシェゲインが異なっているためでもある。

また、4 サンプルの 2 次元スキャンを行った。その結果は図 4.18 である。ここでもヒット数がないピクセルは HAPD または ASIC の dead channel になっている。shp77,117,120 では chipB,C 側の HAPD の範囲外にもヒットがあり、noisy になっていることが分かった。また、shp117 では chipA に当たる部分がほとんどヒットカウントが無い状態になっている。これはバイアス電圧を掛けていく段階でかなり noisy になり、電圧を下げて測定することを試みたが信号として十分読み出せる大きさに達しなかった (十分なゲインが得られなかった) ためバイアス電圧 0V を印加したためである。shp118 では chipD の右下半分がほとんどヒットカウントが無い状態になっている。これについてははっきりした原因は分かっていないが、どの HAPD も測定するために用いた ASIC は同じであるため、shp118 のみに起こった現象であることから HAPD に何かしらの原因があると思われる。shp118,120 では中心付近のヒットカウントが高くなっている。これは光電子後方散乱の効果によるものである。この説明は図 4.18 の後で述べる。

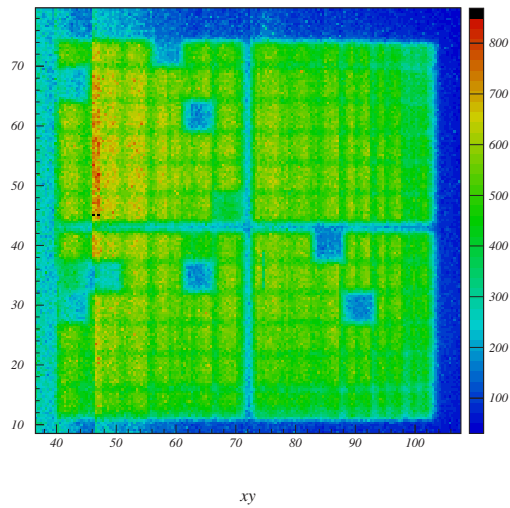


(a) ゲイン

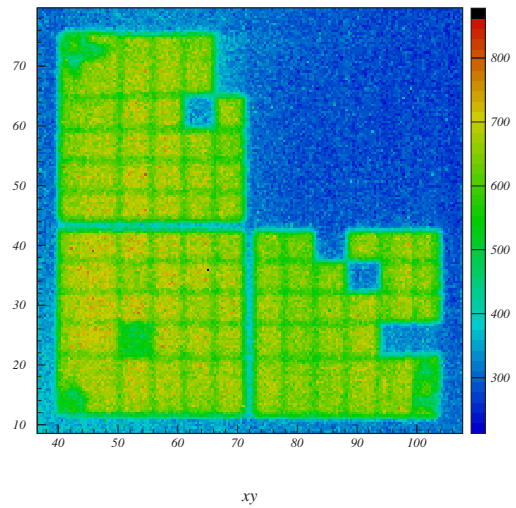


(b) S/N比

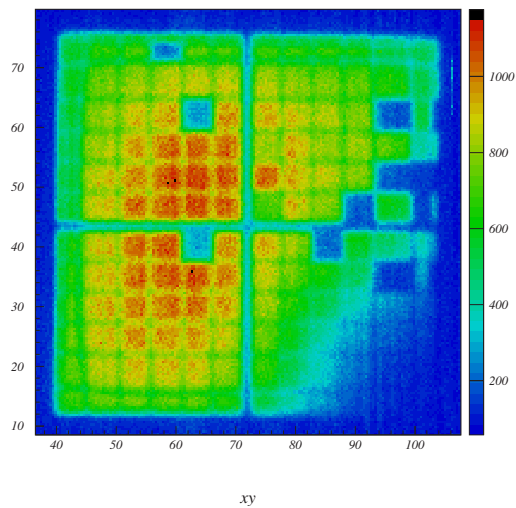
図 4.17: HAPD 全 6 サンプルの性能



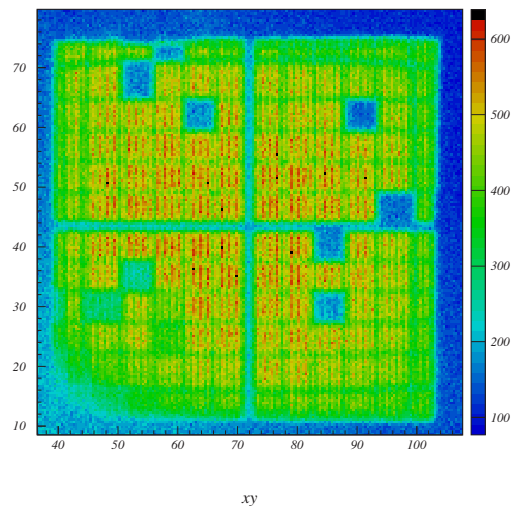
(a) shp77



(b) shp117



(c) shp118



(d) shp120

図 4.18: 2次元スキャン結果

- 光電子後方散乱

光電子後方散乱とは、光電子が HAPD に入射する際に APD 表面で光電子が散乱される現象を示す。模式図を図 4.19 に示す。後方散乱によって HAPD の検出効率の低

下やバックグラウンドの増加が引き起こされる。遠方の APD に入射した光電子が散乱され、別の APD で検出されるといふことが起きる。後方散乱の拡がりは、散乱後の放射角が  $45^\circ$  で弾性散乱をした場合に最大となり光電面～APD 間距離 20mm の 2 倍である 40mm と考えられる。

この問題も側管による電場の歪みと同様に磁場下で改善されることが分かっている。散乱された磁場へ巻き付き広がりや抑えられ、同じピクセルで検出されるヒットカウントが増加すると考えられる。[18]

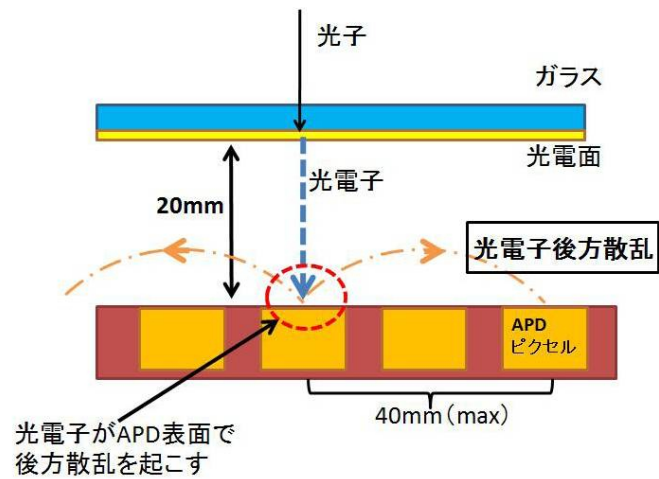


図 4.19: 光電子後方散乱

### 4.3.3 ビーム照射実験前後での性能

SHP70 について、ビーム照射実験前後で性能測定を行っている。そこで、ビーム照射前後で性能にどのような影響があるのかどうかを測定した。

SHP70 の性能測定は、ビーム照射実験前は 2009 年 5 月に測定 (ただし、2D スキャンは 2008 年 9 月に測定)、ビーム照射実験後は 2010 年 10 月に測定した結果について述べる。その結果はノイズレベルを図 4.20 に、ゲイン, S/N 比を表 4.4, 表 4.5 に、2 次元スキャンを図 4.21 に示す。

ビーム照射実験前後でノイズの振舞いはほとんど変化が無かったが、大きさが 2 倍程度大きくなった。ゲイン, S/N 比の平均はビーム照射実験前では  $8.08 \times 10^4$ , 7.99、ビーム照射実験後では  $7.31 \times 10^4$ , 7.92 となった。これより、ビーム照射実験によって性能が悪化すると考えられる。2D スキャンは dead channel のピクセルが異なっているところがあるが、これは用いた ASIC が異なるためだと思われる。色合いで表されるヒットカウントだが、実験前の方が 3 倍程度多い結果となっていた。レーザー光の強弱が若干異なるためビーム照射実験前後で異なっていると考えられるが、どちらも単光子に近いレーザーを当てているため大きな影響がでることは考えにくい。そのため、実験後では位置検出応答性も悪化している。しかし、chipB, C 側の端を除けば応答の一様性や中心付近でヒットカウントがやや高くなっている性能はどちらも確認することが出来た。

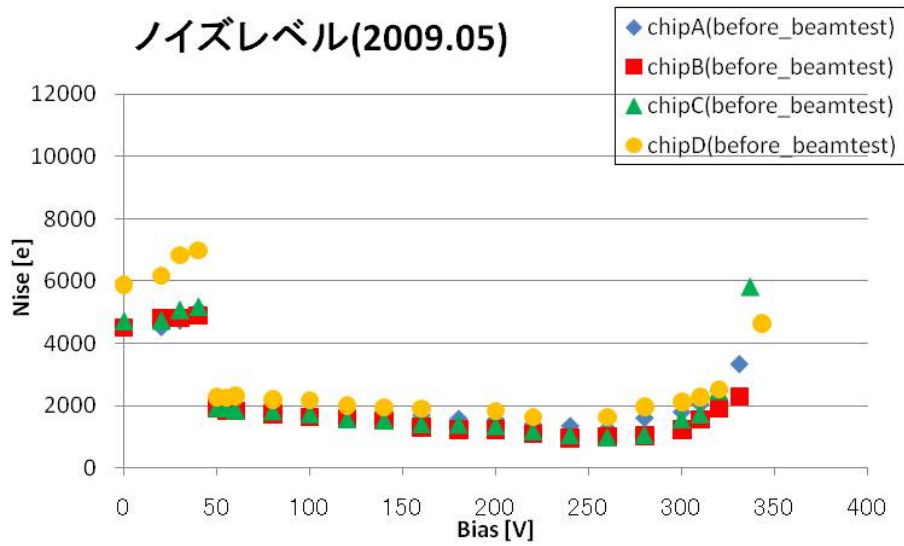
表 4.4: ビーム照射実験前の性能結果

shp70	Bias[V]	Gain	S/N
chipA-22ch	331	$7.25 \times 10^4$	9.61
chipB-29ch	331	$5.98 \times 10^4$	9.25
chipC-22ch	337	$10.0 \times 10^4$	6.15
chipD-22ch	343	$9.05 \times 10^4$	6.92

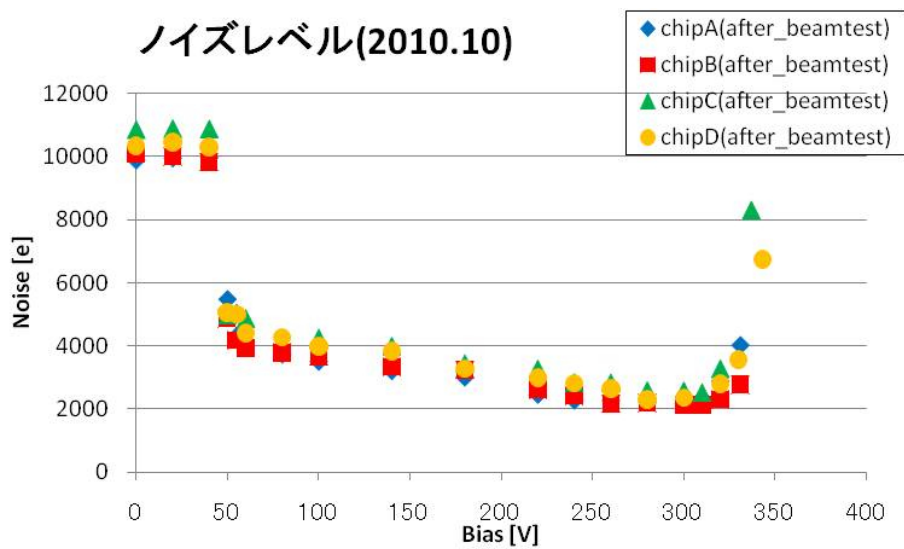
表 4.5: ビーム照射実験後の性能結果

shp70	Bias[V]	Gain	S/N
chipA-22ch	331	$6.23 \times 10^4$	10.86
chipB-29ch	331	$5.29 \times 10^4$	6.97
chipC-22ch	337	$9.35 \times 10^4$	8.22
chipD-22ch	343	$8.37 \times 10^4$	9.94



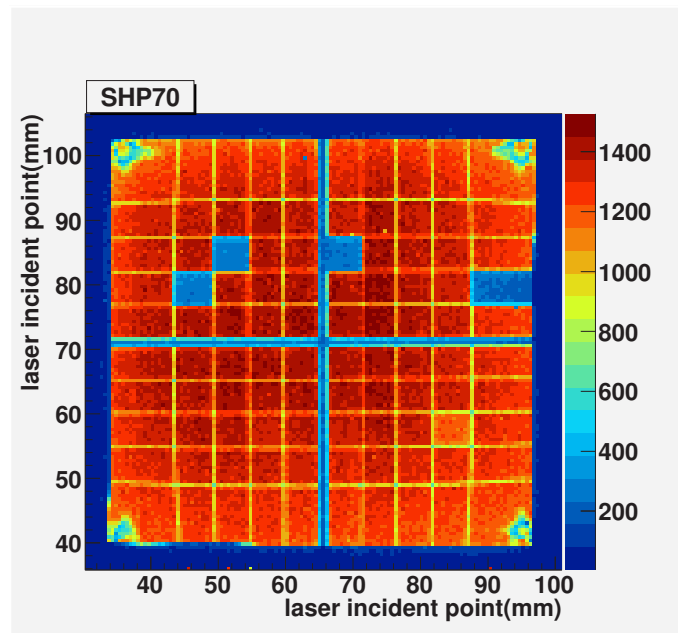


(a) 照射実験前のノイズレベル

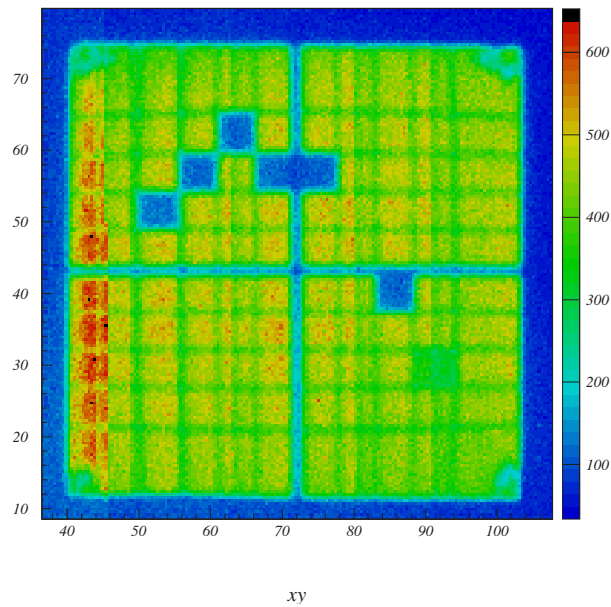


(b) 照射実験後のノイズレベル

図 4.20: shp70 におけるビーム照射前後の性能測定結果



(a) 照射実験前の 2D スキャン (2008 年 09 月測定)



(b) 照射実験後の 2D スキャン (2010 年 10 月測定)

図 4.21: shp70 におけるビーム照射前後の 2D スキャン結果

## 第5章 A-RICH ビーム照射実験と結果

これまで Aerogel を輻射体として用いた Aerogel-Ring Imaging Cherenkov Counter(A-RICH) の開発経緯を以下にまとめた。2002~2005 年では、光検出器にフラットパネル型マルチアノード PMT を用いビーム照射実験を行った。屈折率の異なる Aerogel を組み合わせた Focusing タイプの Aerogel 用いた際、通過粒子当たりの光電子数は 9.1 個、運動量 4 GeV/c の K/ $\pi$  識別能力  $5.5\sigma$  に相当する角度分解能が得られた。2005 年まで Aerogel の性能やその組み合わせ、チェレンコフリングがどのように観測されるかなど、Aerogel に焦点を当てたビーム照射実験を行ってきた。この時、光検出器に使用したフラットパネル型マルチアノード PMT は Belle 検出器中の 1.5 T の磁場で動作することができないため、実用することが出来ない。2008 年のビーム照射実験では、実用化に向けて研究開発を行ってきた光検出器 Hybrid Avalanche Photo Detector (HAPD) と ASIC を用いた読み出し回路の統合試験としてビーム照射実験を行った。このビーム照射実験で初めて HAPD を用いた。  
[1][2][3][4][5]

**1998 年** イメージインテンシファイヤー (IIT) を用いた基礎実験

**2001 年** マルチアノード PMT(Hamamatsu R5900-M16) を用いた宇宙線及び粒子線による実証実験

**2002 年, 2004 年, 2005 年** フラットパネル型マルチアノード PMT(Hamamatsu H8500) を用いたビーム照射実験

**2008 年** HAPD,ASIC を用いた読み出し回路の統合ビーム照射試験により初めてチェレンコフリングイメージの観測に成功

## 5.1 2009年のビーム照射実験

2009年11月、HAPD, ASICを用いた読み出し回路の統合試験として実装を踏まえたプロトタイプ A-RICH を製作し、KEK 富士テストビームラインにおいて運動量 2 GeV/c の電子ビームを照射し検出器の現在の性能を確かめた。

### 5.1.1 富士テストビームライン

富士テストビームラインはBファクトリーを使用した二次ビームラインである。8 GeV電子リング (HER) の富士直線部に設置された電磁石から発生する  $\gamma$  線を真空パイプから取り出し、タングステン標的に当てることにより高エネルギー電子ビームをビームパイプの外へ導きだしテストビームを生成している (図5.1.1)。他のテストビームラインとは異なり、Bファクトリーに支障がないように電磁石の電源やビームラインの運転を行わなければならない。また、HER が運転中のみ使用することができる。

テストビームラインの実験エリアは図5.1.1である。の鉛板ビームシャッターを開けることでビームを実験エリアに導き出すことができる。ビームを使用する際はエリアにビームを導き出すための電磁石の電源を ON にしておく必要がある。

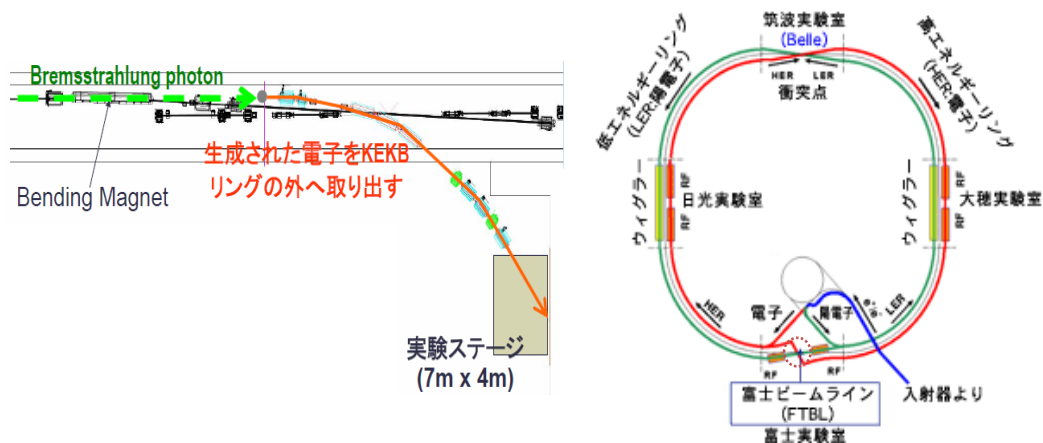


図 5.1: 富士テストビームライン概略図

[6]

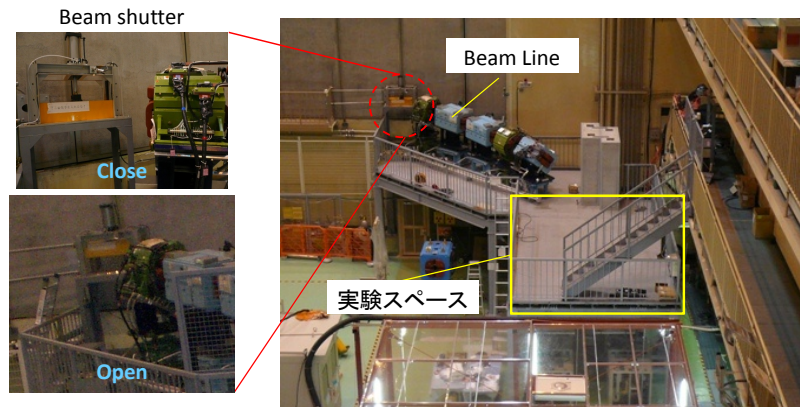


図 5.2: ビームエリア [6]

### 5.1.2 ビーム照射実験のセッティング

ビーム照射実験のセッティングの概略図を図 5.3 に示す。Aerogel, HAPD, ASIC を用いた読み出し回路を暗箱に収め (図 5.4)、暗箱の前後にはビーム入射位置を決めるための MWPC(Multi Wire Proportional Chamber) さらに最上流と最下流にトリガーとなるシンチレーションカウンターを設置した。両方のシンチレーションカウンターを通過した電子ビームトラックのみがトリガーを発行しイベントとして記録される。MWPC は位置分解能をもったガス検出器の 1 つで、電子ビームのトラックの入射位置を検出している。これも暗箱前後にある MWPC を通過したトラックのみが記録され、その検出点を結んだ線分上と検出面が交わる点をビーム入射点として解析を行った。

プロトタイプ A-RICH の構成は上段 HAPD3 個を ASIC SA01 システムで、下段 HAPD3 個を ASIC S04 システムで読み出した。S04 は旧バージョンであり、今回は SA01 システムの数不足、性能比較用、以前のビーム照射実験にも使われていたことから使用された。Belle II 検出器に実装を想定し Aerogel と HAPD 間の距離は 200 mm とし、HAPD の配置やビームの入射角度、用いる Aerogel を変化させる等さまざまな測定を行った。

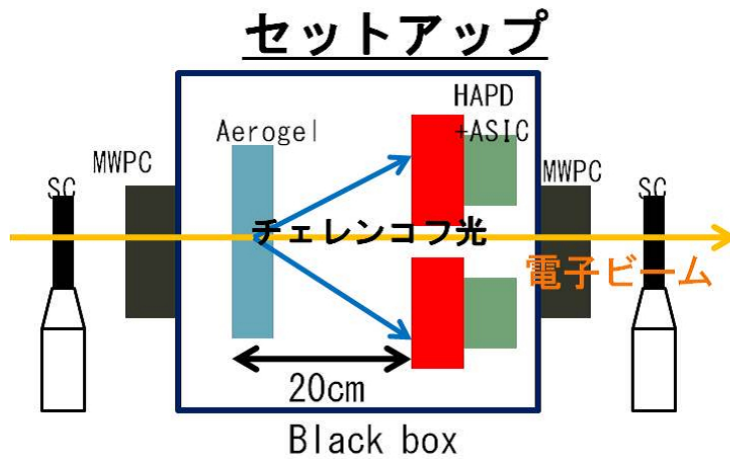
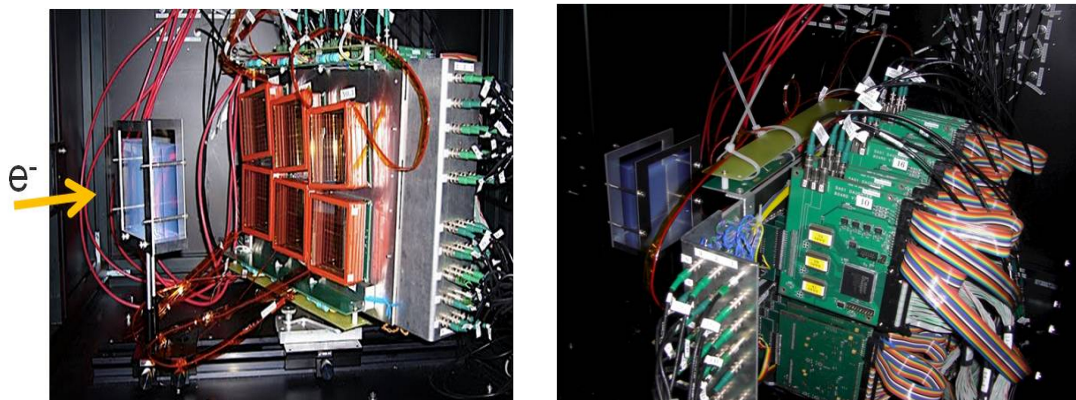


図 5.3: ビーム照射のセッティング (装置の概略図)



(a) ビーム照射の暗箱の中の様子

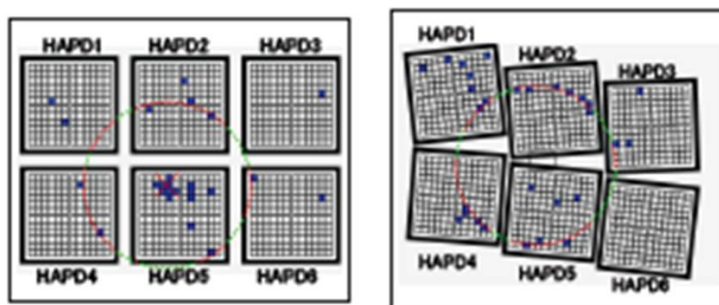
(b) ビーム照射で用いた読み出しボード

図 5.4: ビーム照射のセッティング (暗箱の中の様子)

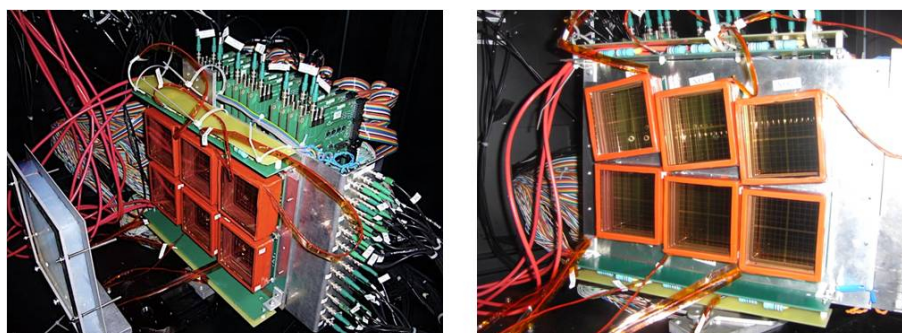
運動量  $2 \text{ GeV}/c$  の電子ビーム照射、屈折率  $n=1.0455$  の Aerogel の場合、発生するチェレンコフ光の放出角度は式 3.1 より、 $0.29 \text{ rad}$  と計算できる。Aerogel と HAPD 間の距離は  $200 \text{ mm}$  に設置するので、リングの半径はおよそ  $60 \text{ mm}$  になる。リングがおさまるように  $72 \text{ mm} \times 72 \text{ mm}$  の HAPD 6 個を横 3 列、縦 2 列に配置した。HAPD の配置は、図 5.5 のように「整列配置」と「扇型配置」の 2 種類を用意した。整列に配置した場合、6 個全体

で 236 mm × 154 mm の有感面積を持つ。整列配置の場合は HAPD 間は 10 mm の隙間をあけて配置してある。また、実際に BelleII 検出器に設置することを想定し 6 個の HAPD を扇状に配置した場合のビーム照射実験も行った。Endcap 設置時は円形状の部分に四角い HAPD で埋めることになるため、HAPD の配置は扇状となる。ビームの入射角度変化も同様で、BelleII 検出器において電子・陽電子衝突点から (図 2.15 参照) Endcap 部の A-RICH 検出器まで  $17^\circ \sim 34^\circ$  の開きがあり、HAPD にはこの角度を持ってチェレンコフ光が入射すると考えられる。そこでビームの入射角度が付けられるように Aerogel, HAPD を固定するフレームが回転する設計になっている。

整列配置も扇型配置も HAPD の中心座標に電子ビームが入射するようにビームラインと位置, 高さを合わせた。



(a) 2 種類の HAPD 配置



(b) 実際の HAPD 配置の様子

図 5.5: HAPD の配置 [16]

### 5.1.3 FocusingタイプのAerogel

多くの光電子数を得るためには、単純にAerogelを厚くしていけば良いのだが角度分解能が悪くなってしまふ。そこで、厚さを増していくごとに屈折率が大きくなるようにAerogelを重ねていけば発生したチェレンコフ光はフォーカスされ、原理的に同屈折率で同じ厚さのAerogelより角度分解能が良くなる(図5.6)。このようなAerogelをFocusingタイプと言う。今回のビーム照射実験では、Focusingタイプを採用している。

FocusingタイプのAerogelは異なる屈折率のものを複数枚重ねることで光電子数増加と角度分解能向上を実現させている。Aerogel 2枚重ねの時に選ぶ屈折率は、ビーム入射方向に対して上流側のAerogelで作るチェレンコフ光と下流側で作るチェレンコフ光が光検出器で重なることを条件にして求めることができる。Aerogelの厚さを $d$ 、下流側のAerogelの中心から光検出器までの距離を $L$ 、上流・下流で発生するチェレンコフ光の放射角度を各々 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ とすると、光検出器でリングが重なる時以下の条件を満たす。

$$L \cdot \tan\theta_2 = (L + d)\tan\theta_1 \quad (5.1)$$

角度を屈折率の関係に直してやると、

$$n_2 - n_1 = \frac{d}{n_1 L} \left[ n_1^2 - 1 - \frac{(mc)^2}{p^2} \right] \quad (5.2)$$

となる。ここで $m, p$ はそれぞれ、 $\pi$ 中間子の質量と運動量である。これより、次に重ねるAerogelの屈折率を目安として決めてやることができる。[3]

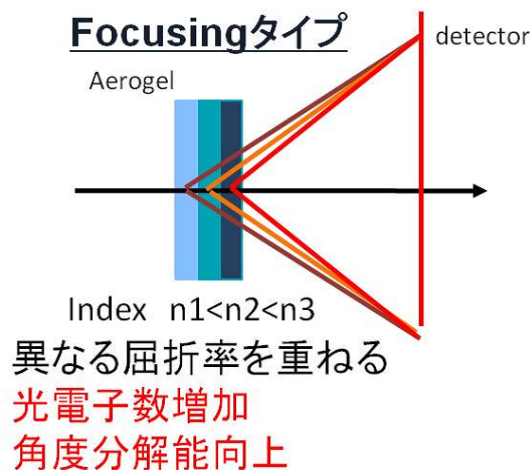


図 5.6: Focusing タイプ



## 5.2 データの取得

1 track の電子ビームが入射に対して、以下のデータを読み出す。

- シンチレーションカウンターのタイミング (時間) 情報
- シンチレーションカウンターと鉛ガラスカロリメータの波高分布
- MWPC 2 台、計 10 ch のタイミング (時間) 情報
- HAPD 光子入射有無の情報 全 864 ch

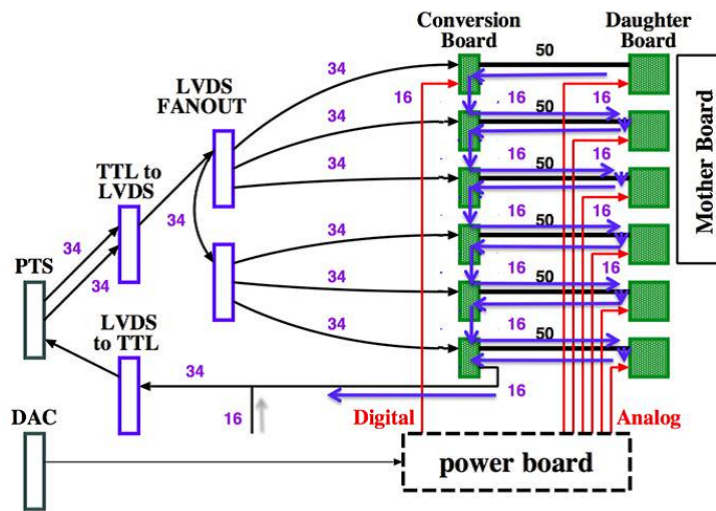
MWPC とシンチレーションカウンターのタイミング (時間) 情報から電子ビームの入射位置を検出し、ASIC からの読み出しで HAPD のどのチャンネルに光電子が入射したかを特定し、チェレンコフリングイメージを捉える。

HAPD 6 台の信号読み出しは ASIC で行うが、その読み出し方法について図 5.7 に示す。上段 3 個の HAPD を読み出すために SA01 を、下段 3 個の HAPD を読み出すために S04 を用いた。S04 のチャンネル数が 18、SA01 は 12 であるので照射実験では S04 を 24 枚、SA01 を 36 枚使用した。

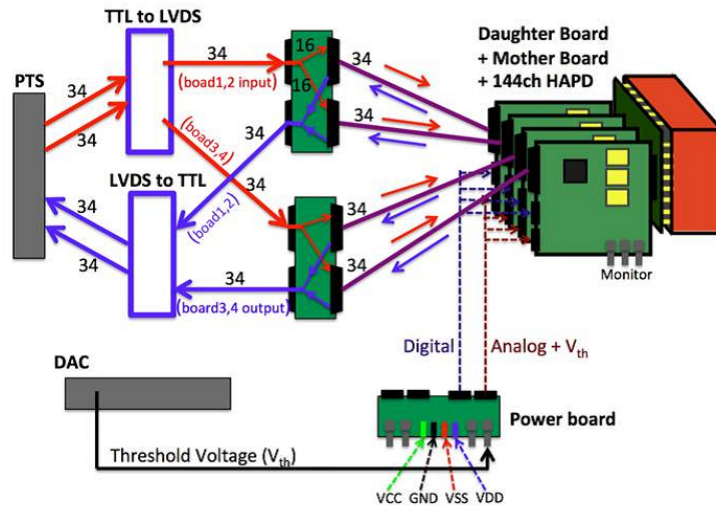
S04 は図 5.7(a) のように HAPD からのデジタルデータを読み出す。まず、VME モジュール (PTS) からデータを読み出す為のクロック信号が各 ASIC に送られる (図中の黒矢印)。このクロック信号によって各 ASIC 内のシフトレジスタに保持されていたデジタルデータが次々に押し出されてシリアルに読み出され、VME モジュールに送られていく (図中の青矢印)。ビームテストでは 6 枚の daughter board を 1 組として信号読み出しを行なっている (6 枚の S04 内のシフトレジスタが連結され、1 つのシフトレジスタを形成されている)。

SA01 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(b))。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。

また、HAPD のピクセルと読み出しチャンネルの対応を図 5.8 に示す。



(a) S-series の読み出しシステム



(b) SA01 の読み出しシステム

図 5.7: プロトタイプ A-RICH における読み出しシステム

## SA01



光電面側より

上段: HAPDのCh  
下段: ASICのCh(Board毎での通しCh番号)

図 5.8: HAPD ピクセルと読み出しチャンネルの対応

### ★ 読み出し回路の Threshold 決定方法

ASIC のスレッショールド設定はノイズ分布のピークから  $4\sigma$  のところがスレッショールドとなるように (図 5.9) ピークの中心位置 (オフセット) を調節することで、2 値化する閾値を決めている。この  $4\sigma$  にすることで 99 % 以上のノイズをカットすることが出来、シングルフォトンの信号だけを検出することが出来る。

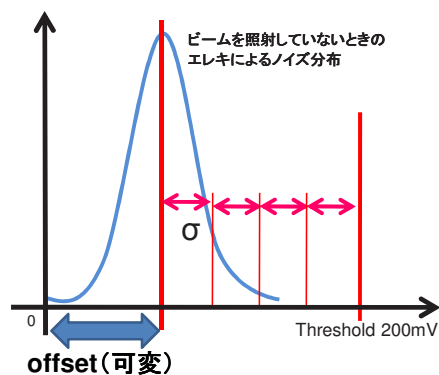
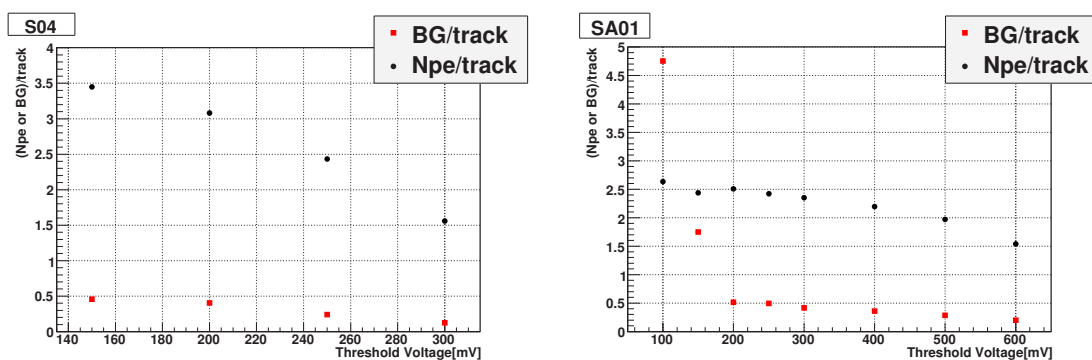


図 5.9: ASIC のノイズ分布とスレッショールドの決定

今回のビーム照射実験では、HAPD には7 kV の高電圧を印加し、スレッショールドを100 mV~250 mV としてオフセット設定を行い、電子ビームを照射した。各スレッショールドで得られた光電子数、バックグラウンドを図5.10 に示す。この結果よりノイズもカット出来、単光子レベルの波高を検出するのに最適であるスレッショールド値を決定する。

S04,SA01 共に単光子レベルの波高が読み出せるように合わせてスレッショールドを200mV に設定した。



(a) S04 の結果

(b) SA01 の結果

図 5.10: threshold による光電子数・バックグラウンドの変化

ビーム照射実験で A-RICH の様々な状態において電子ビームを照射し、およそ合計 200 データを取得した。主に取得したデータの種類を以下に示す。

(1) Threshold scan

同条件で読み出し回路のスレッショールドやそれに関与するパラメーターファイルを変えてビーム照射を行った場合のデータ。

(2) Angle study

入射ビームに角度を持たせ実験を行った場合のデータ。

(3) HV scan

HAPD の適正高電圧を決定するため、同条件で HAPD の高電圧のみを変化させた場合のデータ。

(4) Focusing

光電子数と角度分解能向上のため、輻射体の厚みを増すごとに高屈折率となるような Aerogel を使用した場合のデータ。

(5) High index

高屈折率の Aerogel を 1 枚または複数、使用したデータ。

(6) Aerogel study

高屈折率や black sheet、huge tile など様々な Aerogel を用いてビーム照射を行った場合のデータ。

(7) Standard run

屈折率 1.0455, 厚さ 19.6 mm の Aerogel KMD4-1 を使用し、スレッシュホールドと HAPD の高電圧は最適値、かつビーム垂直照射の場合のデータ。

(8) Filter

透過長の異なる filter を用いた場合のデータ。

(9) Realistic configuration

Belle 検出器内に設置を想定し、扇型に HAPD を配置した場合のデータ。

### 5.3 評価方法

ビーム照射実験で得られたデータから A-RICH の性能を評価する方法について述べる。まずチェレンコフリングが観測できることを確認し、次にチェレンコフ角度分解能, 検出光電子数, バックグラウンドについて評価をする。電子ビームの 1 track の通過位置と HAPD のヒット座標を用い、チェレンコフリングイメージと角度を得ることができる。

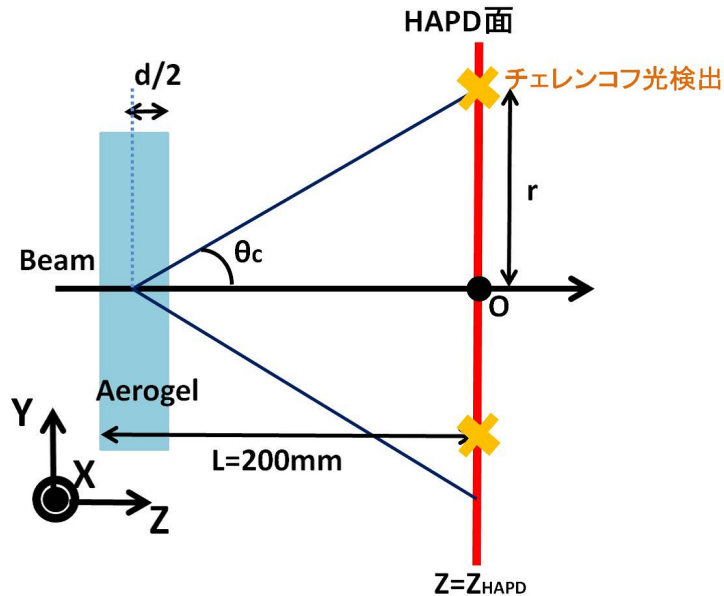


図 5.11: A-RICH 側面図

A-RICH の側面図 (図 5.11) をもとに解析手順を述べる。

#### 1. トラック通過位置の計算

HAPD 面に入射したビームの XY 位置座標  $O(inx, iny)$  を MWPC によって求める。これがチェレンコフリングの中心座標となる。

#### 2. HAPD ヒット座標の計算

6 個の HAPD の各チャンネル (144 チャンネル × 6 台) から読み出されるチェレンコフ光ヒット情報を取得する。この時のヒット座標  $(hitx, hity)$  とする。ビーム 1 track で得られたデータを 1 イベントと定義すると、毎イベント得られたデータに対し  $(hitx - inx, hity - iny)$  をプロットする。ビーム入射位置を中心としたチェレンコフリングの統計データが得られる (図 5.12(a))。

### 3. チェレンコフ光角度計算

ビーム入射位置を中心とし、チェレンコフリングの半径  $r$  を計算すると

$$r = \sqrt{(hitx - inx)^2 + (hity - iny)^2} \quad (5.3)$$

となる。

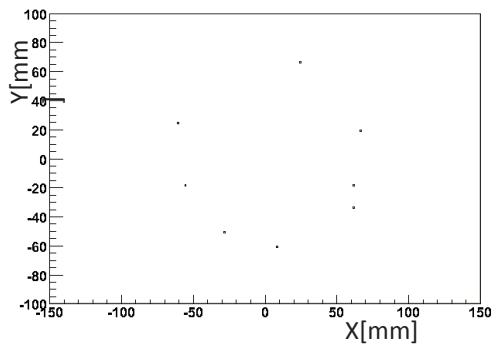
チェレンコフ光は Aerogel の厚さの中心で発光すると仮定<sup>1</sup>し、発光点から HAPD 面までの距離は図 5.11 によると  $L-d/2$  となる。各 HAPD のヒット座標ごとにチェレンコフ角度  $\theta_c$  を計算する。

$$\theta_c = \arctan \frac{r}{L - \frac{d}{2}} \quad (5.4)$$

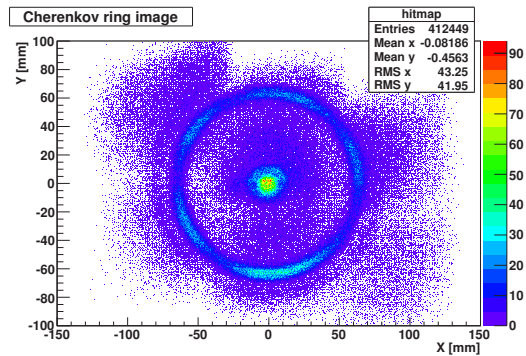
ビーム照射実験で得られたデータの一例を示すと、まず 1 track ごとで得られたリングイメージは図 5.12(a) である。全入射 track に対するリングイメージをこのデータを積算することで図 5.12(b) のように得られる。そして、HAPD の各ヒットごとに計算されたチェレンコフ角度を全入射 track 分集めると、図 5.12(c) が得られる。

---

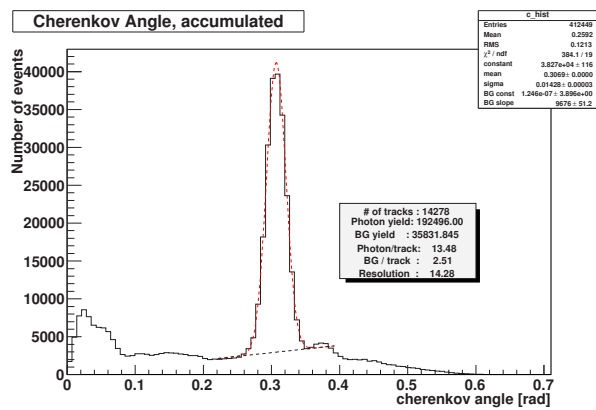
<sup>1</sup>実際はあらゆる深さでチェレンコフ光は発光するが、真の発光点を知ることは難しいため、解析では Aerogel の厚さの中心からチェレンコフ光が発光すると仮定している



(a) 1 イベントのリングデータ



(b) リングイメージ



(c) チェレンコフ角度分布

図 5.12: リングイメージとチェレンコフ角度分布の一例

チェレンコフ角度分布が図 5.13 のように得られたとする。横軸が検出した HAPD のピクセルの hit 位置から再構成された角度、縦軸がそのイベント数である。0.3 rad 付近のピークは Aerogel からのチェレンコフ光によるピークである。そのピークに対してガウス関数と 1 次関数でフィッティングを行う。フィッティングした 1 次関数より下の領域をバックグラウンド (B) として扱い、これを差し引いたピーク面積が検出された光電子数 (P) に相当する。フィッティング後に検出した光電子数とバックグラウンドを計算する。[1][2][3]



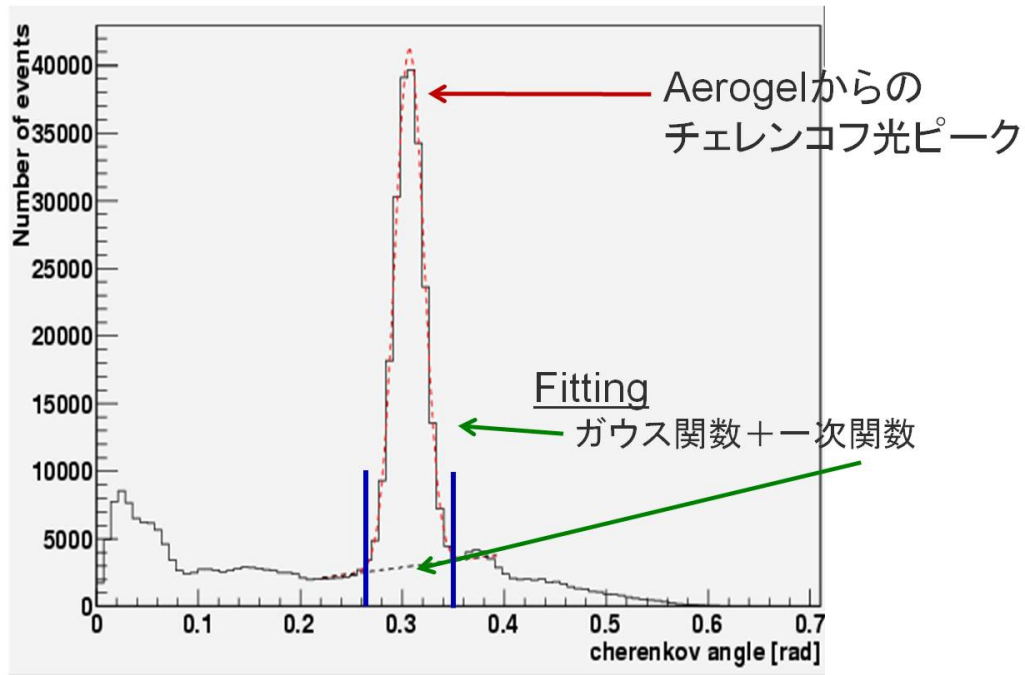


図 5.13: 解析手順 1

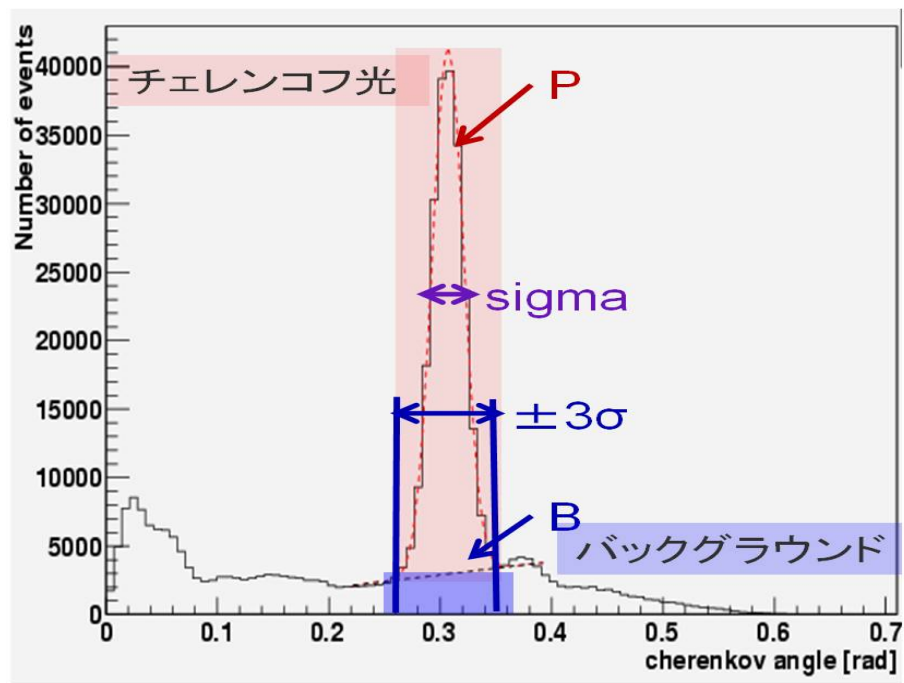


図 5.14: 解析手順 2

光電子数、バックグラウンド数、チェレンコフ角度分解能の導出を以下のように定義する。

- ★ 1 track あたりの光電子数  $N_{pe}$  : ピークを中心値から  $\pm 3\sigma$  の範囲で積分した合計の光電子数 (P) を全 track 数で割る
- ★ 1 track あたりのバックグラウンド  $BG/tracks$  : 1 次関数フィッティング以下の領域を  $\pm 3\sigma$  で積分した合計のバックグラウンド (B) を全 track 数で割る
- ★ 1 光電子あたりの角度分解能  $\sigma_{photon}$  : ガウス分布の Sigma
- ★ 1 track あたりの角度分解能  $\sigma_{track}$  :  $N_{pe}$  と  $\sigma_{photon}$  より,  $\sigma_{track} = \frac{\sigma_{photon}}{\sqrt{N_{pe}}}$

## 5.4 実用に向けたプロトタイプ A-RICH 検出器の性能評価

ビーム照射実験は 2008 年 3,6 月にも行われており、2009 年 11 月のビーム照射実験で 3 回目になる。この節では、2008 年のビーム照射実験で得られた性能を結果のみ簡潔に記述し、2009 年 11 月のビーム照射実験から得られた性能について主に記述していく。

### 5.4.1 2008 年のビーム照射実験

2008 年 3,6 月に 144ch HAPD と読み出し回路 ASIC を用いたプロトタイプ A-RICH 検出器の最初のビーム照射実験を行った。図 5.15 の左図は実際に得られた全 track の合計でのリングイメージであり、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)。この図から初めてチェレンコフリングの観測に成功したと言える。また右図はビーム照射実験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。この設定は、Aerogel が屈折率 1.0462、1.0501、1.0560 で各 Aerogel の厚さが 10mm の 3 枚を Focusing タイプとして用いている。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 A-RICH 検出器の性能は、

- 光電子数 ( $N_{pe}/track$ ) : 6.9
- 1track 当たりの角度分解能 : 5.3mrad (12.7 mrad/1p.e)

である。運動量  $4\text{GeV}/c$  の K 中間子、 $\pi$  中間子のチェレンコフ放射角の差は約 23 mrad であるため、この運動量領域で  $4.1\sigma$  の K/ $\pi$  粒子識別を有している結果となり、A-RICH 検出器の目標である  $4\sigma$  での K/ $\pi$  粒子識別を達成した。しかし、実際に Belle II 検出器にインストールした際は 1track 毎に粒子識別することを考えると 1track 当たりでの検出光電子数が 6.9 では少なく、改善が求められる結果となった。そこで、2009 年のビーム照射実験では検出光電子数を増やすために Aerogel、HAPD の改良を行なった。改良点の詳細は次節で述べる。

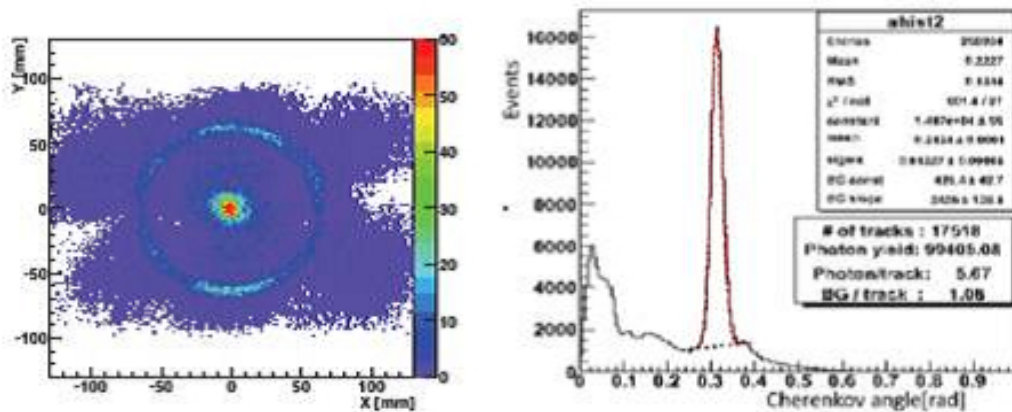


図 5.15: 2008 年のビーム照射実験の結果 (リングイメージとチェレンコフ角度分布)

#### 5.4.2 2009 年のビーム照射実験の結果 (過去の結果との比較)

2008 年の結果より検出光電子数を増やす必要があることが分かったが、2009 年のビーム照射実験ではこの対策として 2 点が考えられ、改良が行われた。

- Aerogel の透過率の向上
- HAPD の量子効率の向上 (目標:量子効率 (QE)30% 以上)

1 つ目は Aerogel の透過率を高くすることによって HAPD まで到達する光子数を増やすためであり、特に Focusing タイプで 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ことが求められた。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ためである。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。

ここで 2008 年、2009 年のビーム照射実験で性能比較するための設定で用いた Aerogel と HAPD を示す。HAPD の配置を図 5.16 に示し、表 5.1, 表 5.2 には Aerogel の情報、HAPD の情報をそれぞれ示す。

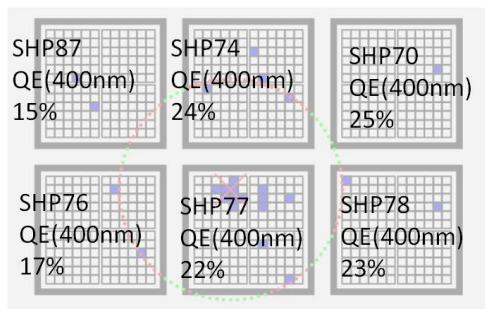
表 5.1 の 3 つは 2008 年、2009 年両方のビーム照射実験に使用した Focusing タイプの Aerogel であり、表 5.2 は 2009 年に使用した HAPD である。SHP117 が High QE 対策品であり、表からも分かるように QE が 30% を超える HAPD の製作に成功している。

表 5.1: 08,09 年ビーム照射実験で用いた Aerogel 情報

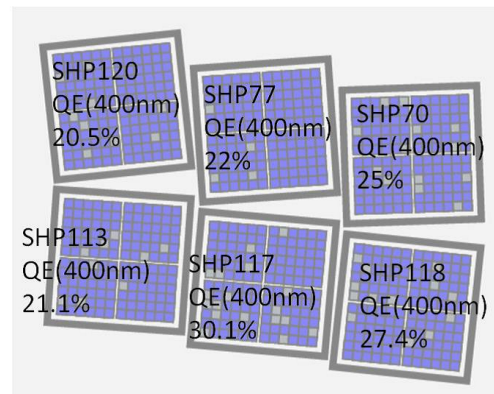
Aerogel No.	屈折率	透過長 [mm] (@400nm)	厚さ [mm]
J07-A2	1.0462	46.9	10
J07-B2	1.0501	41.4	10
J07-C2	1.0560	35.4	10

表 5.2: 08,09 年ビーム照射実験で用いた HAPD 情報

HAPD No.	QE[%] (@400nm)	
SHP113	21.1	
SHP117	30.1	High QE 対策
SHP118	27.4	
SHP120	20.5	
SHP87	15.0	
SHP77	22.3	
SHP70	35.0	



(a) 2008 年での HAPD 配置



(b) 2009 年での HAPD 配置

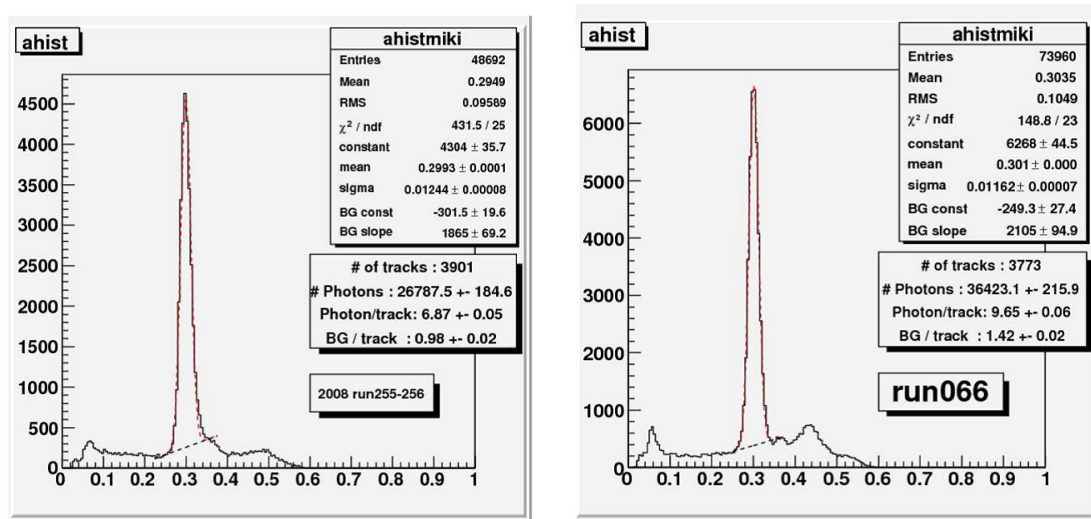
図 5.16: 08,09 年ビーム照射実験での HAPD の配置

2008年の結果からこのような改善策を取り、2009年のビーム照射実験に臨んだ。そして、A-RICH 検出器の性能評価を行った。結果として図5.17は、得られたチェレンコフ角度分布であり、表5.3は使用したHAPDのQE、検出光電子数をまとめたものである。

2008年から向上した性能を以下にまとめると

- 平均QEは、21.6%(08年測定)、24.2%(09年測定) : 1.12倍の向上
- 検出光電子数は、6.9(08年測定)、9.7(09年測定) : 1.4倍の向上

である。また、整列配置から扇型配置にしたことでTotal Acceptance<sup>2</sup>は0.561(08年測定)から0.680(09年測定)となり、光電面をバイアルカリからスーパーバイアルカリにしたことで量子効率の向上につながった。これらより光電子数の増加、識別能力等の性能向上がみられた。表5.4よりHAPDの改善がきちんと評価でき、さらに運動量4GeV/cでのK/ $\pi$ 識別能力も $5.9\sigma$ となりA-RICH 検出器の性能として大幅な向上につながった。また、平均QE 30%のHAPDを準備することができれば検出光電子数がさらに1.2倍に増やすことが出来るため、さらなる改善が期待される。



(a) 2008年の測定結果

(b) 2009年の測定結果

図 5.17: 08,09年ビーム照射実験で得られたチェレンコフ角度分布

<sup>2</sup>Acceptance とは、HAPD 内に入った点数/総分割点数で表される。

表 5.3: 08,09 年のビーム照射実験による性能結果

HAPD	2008			2009		
	QE @400nm	Acceptance	検出 光電子数	QE @400nm	Acceptance	検出 光電子数
1	15	0.06	0.4	20.5	0.09	1.0
2	24	0.16	2.3	22	0.17	2.6
3	25	0.05	0.6	25	0.08	1.1
4	17	0.07	0.7	21.1	0.15	1.8
5	22	0.16	2.4	30.1	0.17	2.9
6	23	0.05	0.5	27.4	0.03	0.4

表 5.4: 08,09 年のビーム照射実験による A-RICH 検出器の性能

	2008 年	2009 年
$N_{pe}$	6.9	9.7
BG	1.1	2.5
角度分解能/track[mrad]	5.6	3.9
K/ $\pi$ 識別能力 (@4GeV/c)	4.1	5.9

## 5.5 最高性能に達したセットアップでの性能評価

HAPD の配置を変更したり、Aerogel の屈折率や組み合わせを変更したり、ビームに入射角度をつける等 様々な測定を行った。その中で最も高い性能を示したセットアップでの A-RICH 検出器性能の測定結果をまとめる。まず、使用した Aerogel は Focusing タイプで表 5.5 の 2 枚である。どちらも高屈折率、高透過率を有している。HAPD の配置は図 5.16(b) と同じ扇型配置である。また、同様の設定でビームに入射角度をつけて A-RICH 検出器の性能を測定したので、その結果は次節で述べる。

表 5.5: 最高性能時に用いていた Aerogel 情報

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
PDR11-4a	1.0646	55.4	20	高透過率対策

運動量  $2\text{GeV}/c$  の電子ビームを HAPD に対して垂直に入射し (入射角度  $0^\circ$ )、A-RICH 検出器の性能測定を行った。(図 5.18 は 1track でのヒットの様子を表し、推定リングイメージを描き出している。) 結果を以下に示すと図 5.19 は測定で得られたリングイメージとチェレンコフ角度分布である。検出光電子数の頻度分布を図 5.20 に、A-RICH 検出器の性能を表 5.6 にまとめた。K/ $\pi$  識別能力は  $5.9\sigma$  という高い性能が得られた。また、2009 年のビーム照射実験では 1track でも十分にリングイメージを観測することが出来るほどの光電子数を検出できていることが分かった。

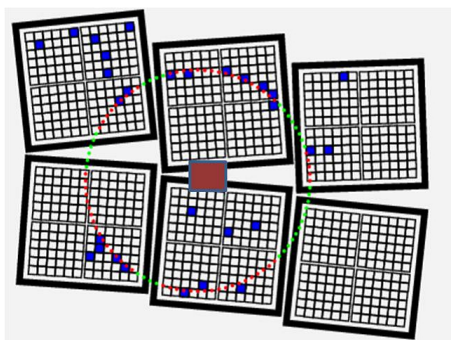
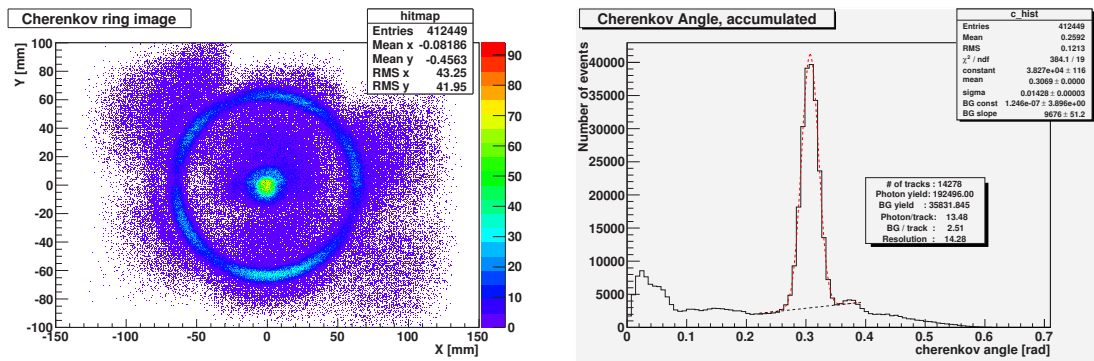


図 5.18: 1track でのヒット分布 :赤線で描かれた円はこのセットアップのもとで電子トラックの通過位置 (同図の赤い四角) が得られたときに計算される推定リングイメージである。





(a) リングイメージ

(b) チェレンコフ角度分布

図 5.19: 得られたリングイメージとチェレンコフ角度分布

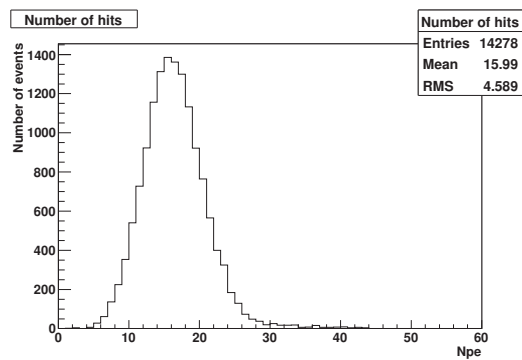


図 5.20: 検出光電子数の分布

表 5.6: 最高性能を示した時の A-RICH 検出器の性能

run48	検出 光電子数	バックグラウンド	角度分解能/track [mrad]	K/ $\pi$ 識別能力 (@4GeV/c)
	13.48	2.51	3.89	$5.91\sigma$

### 5.5.1 ビームの入射角度に対する評価

2.5.2 節で述べたように、Belle II 検出器のエンドキャップ部では衝突点からの角度  $17^\circ \sim 34^\circ$  をカバーするように設置されているため、入射角度を持って検出器に入射してくると考えられる。そこで実装することを踏まえ、扇型配置にした HAPD に電子ビームを  $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$  の 3 つの角度をつけて入射させた場合の測定を行い、A-RICH 検出器の性能を評価した。Aerogel と HAPD のセットアップは前節と同様である。

ビームの入射角度に対し検出器全体を  $\theta$  傾けることによって (5.21(a)) 入射角度をつけている。実際の様子を 5.21(b) に示す。

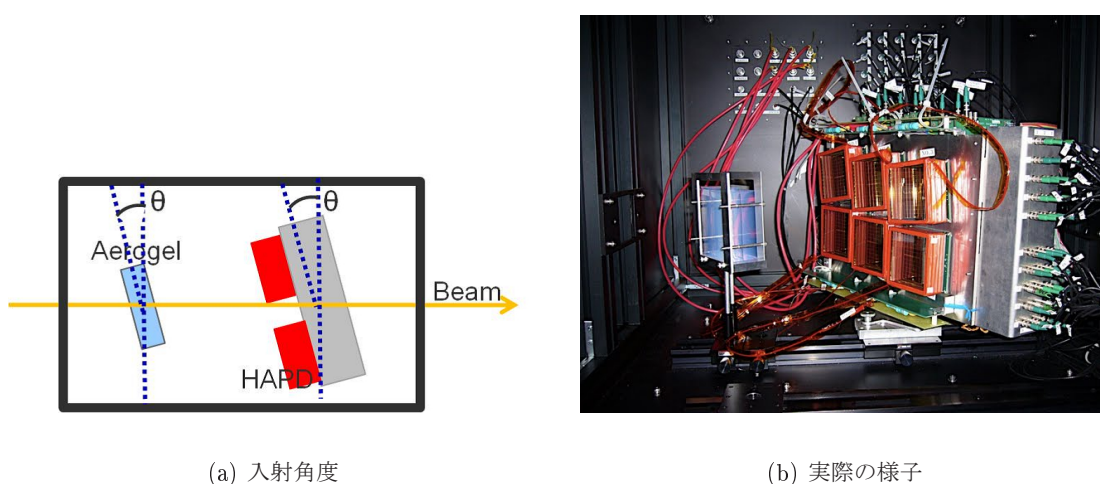
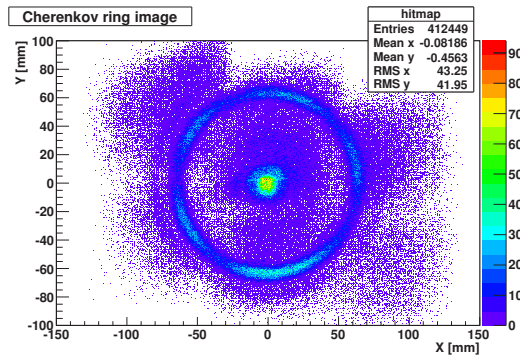
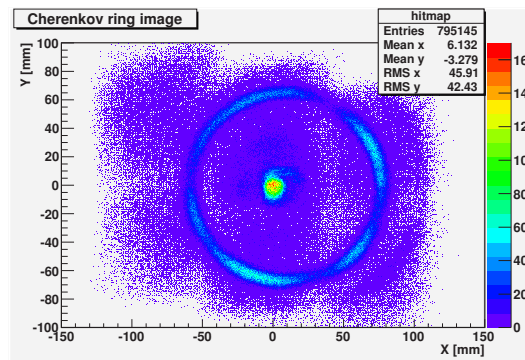


図 5.21: ビームの入射角度を変えて照射

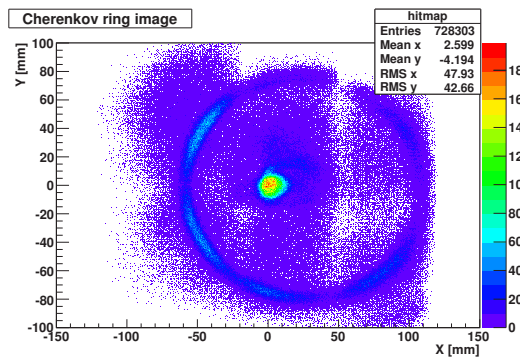
角度  $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$  の時での A-RICH 検出器の性能結果を以下に示す。図 5.22 は各入射角度で得られたリングイメージである。どの角度でもリングイメージが観測できることが分かった。顕著に見えるのは図 5.22(c) あるが、リングが薄れている部分や欠けている部分があるのは HAPD の不感領域に重なったため、または HAPD 間で検出器が無い部分に重なったためと思われる。図 5.23 は測定で得られたチェレンコフ分布である。入射角  $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$  全ての結果において  $0.30 \text{ rad}$  付近にピークが立っている。これは式 3.1 から計算できるチェレンコフ光の放出角度  $0.29 \text{ rad}$  とほぼ一致する。



(a) 入射角度  $0^\circ$

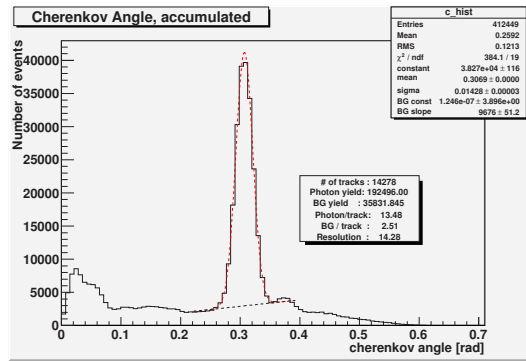


(b) 入射角度  $15^\circ$

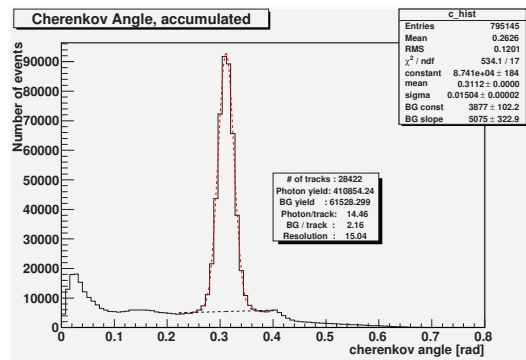


(c) 入射角度  $30^\circ$

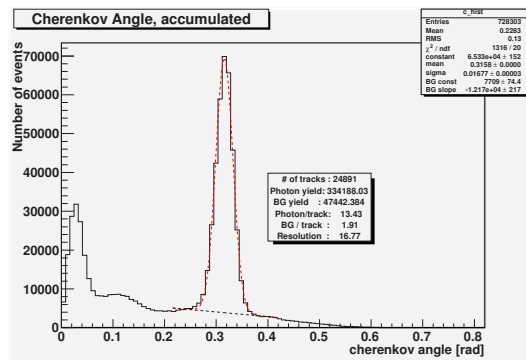
図 5.22: ビームの入射角度に対するリングイメージ



(a) 入射角度  $0^\circ$



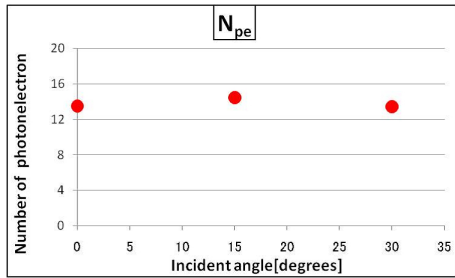
(b) 入射角度  $15^\circ$



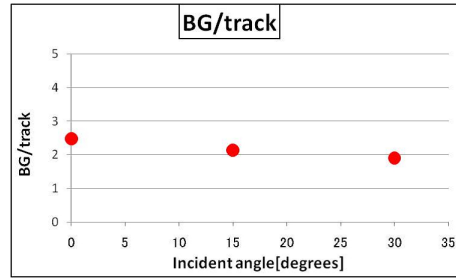
(c) 入射角度  $30^\circ$

図 5.23: ビームの入射角度に対するチェレンコフ角度分布

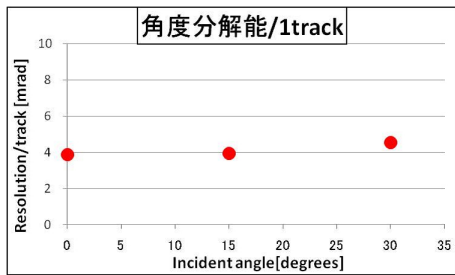
入射角度に対する A-RICH 検出器の性能を図 5.24, 表 5.7 にまとめる。



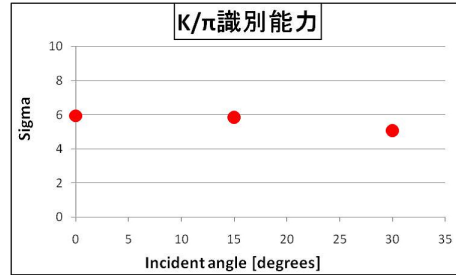
(a) 検出光電子数



(b) バックグラウンド



(c) 角度分解能/track



(d) K/π 識別能力

図 5.24: ビームの入射角度に対する A-RICH 検出器の性能

表 5.7: 入射角度に対する A-RICH 性能評価

入射角度	N <sub>pe</sub>	BG	Sigma/track [mrad]	K/π 識別能力 (@4GeV/c)
0°	13.52	2.48	3.87	5.94
15°	14.46	2.14	3.93	5.85
30°	13.41	1.92	4.54	5.06

検出光電子について、入射角度 15° の時に増加しているのは角度が付いたことで入射ビームが通る Aerogel の厚さが 0° の時よりも増えるためであり、入射角度 30° の時に減少しているのは HAPD の角度が付きすぎてリングが検出器からはみ出すようになってしまったためだと考えられる。バックグラウンドに関しては大きな変化は見られず、K/π 識別能力はどの入射角度の場合でも 5σ 以上という高い性能が得られ、運動量 4GeV/c で 4σ 以上の分離を目指すという条件を十分に満たす結果になった。

## 5.6 Aerogel 境界にビームが入射した場合の性能評価

Belle II 検出器に実装すると Aerogel を大量に並べることになり、Aerogel の境界が必ず出来る (イメージは図 5.25)。そこでビームが Aerogel の境界に入射した場合に A-RICH 検出器性能にどのような影響が出るのかを評価するための測定を行った。境界面では、Aerogel 内で発生したチェレンコフ光の散乱や反射が起こる可能性がある。使用した Aerogel は Focusing タイプで表 5.8 の 2 種類を 2 枚ずつ使い、電子ビームがちょうど Aerogel の境界に入射するようにセットする。セットアップの様子は図 5.26(a) である。また、HAPD の配置は図 5.16(b) と同じ扇型配置である。

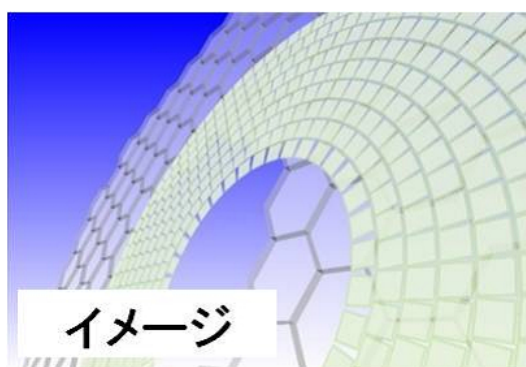
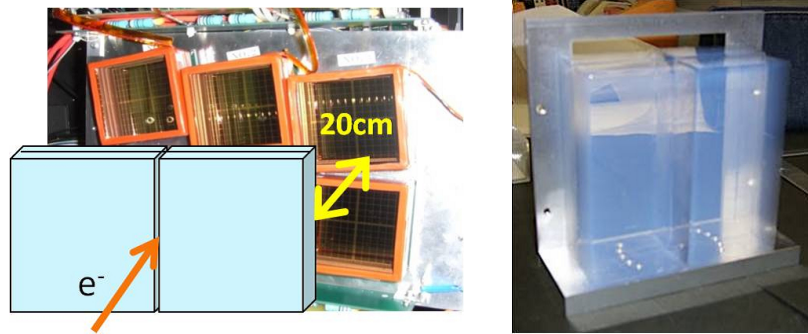


図 5.25: エンドキャップ部の検出器のイメージ

表 5.8: Aerogel 境界の測定に用いた Aerogel 情報

Aerogel No.	屈折率	透過長 [mm] (@400nm)	厚さ [mm]
PDR19-2b	1.0427	49.6	20.3
PDR17-1a	1.0510	47.2	20.3



(a) Aerogel 境界の測定のセットアップ

(b) 実際の Aerogel の様子

図 5.26: Aerogel 境界の測定のセットアップの様子

ここで図 5.27 にあるように、Aerogel 表面でチェレンコフ光が発生した場合に影響を及ぼす可能性がある範囲を計算すると、計算式は以下になる。

$$x = d \times \tan\theta \quad (5.5)$$

図 5.27 の場合を考えると、

$$x = d \times \tan\theta = (20.3 + 20.3) \times \tan(0.3[\text{rad}]) = 12.6 \text{ mm} \quad (5.6)$$

となり、約 12mm の範囲内に境界による影響が性能に出てくると思われる。

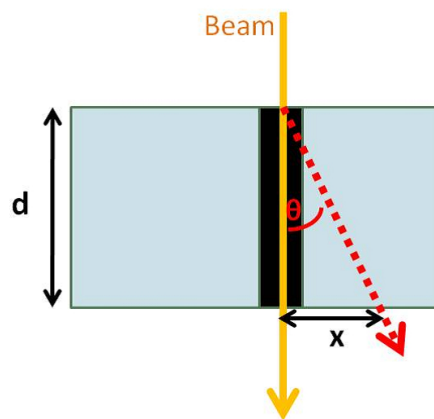


図 5.27: Aerogel 境界による影響範囲

### 5.6.1 解析方法

Aerogel の境界にビームを入射させた時の A-RICH 検出器の性能評価を行うため、中心となる位置 (原点) を設定する。今回の解析では HAPD 面上に条件を付けて解析していく。HAPD の中心位置を原点とおき、HAPD1,4 側をマイナス、3,6 側をプラスとして幅 1mm ごとに x 軸を分割する。(参照:図 5.28) つまり、x 軸の原点を中心とし ±1mm の幅で A-RICH 検出器の性能を評価する。

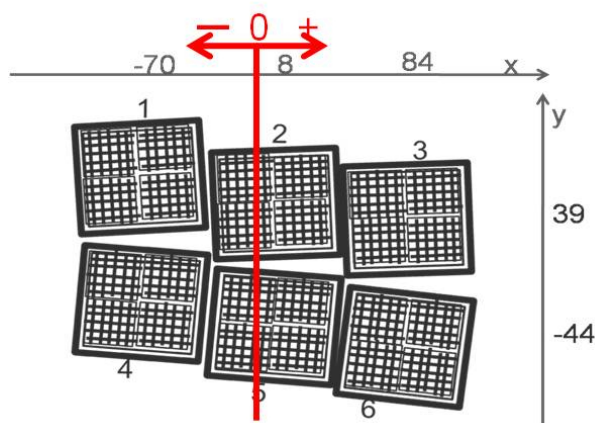


図 5.28: 解析のための座標設定

### 5.6.2 Aerogel 境界の有無による性能評価

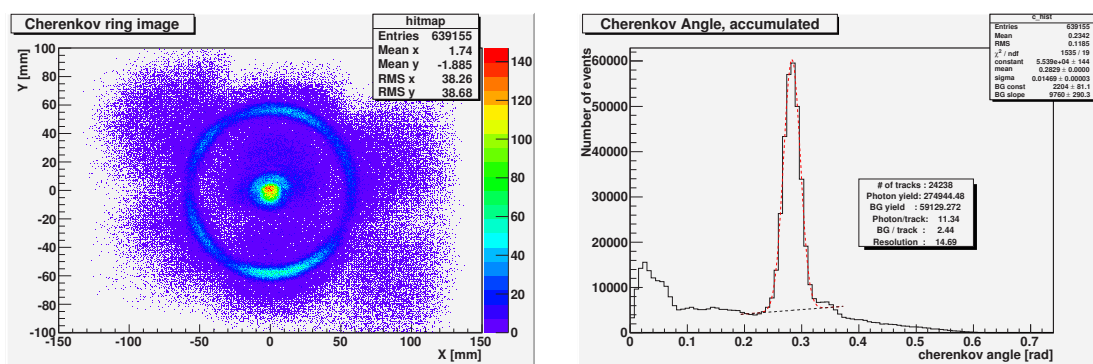
境界にビームを照射した場合に性能にどのような影響が出るかどうかを評価するために、Aerogel を 2 つに切断したものを並べて境界を作り、そこにビームを入射させた測定や、切断方法を変えたものを使用したり、入射角度をつけた測定も行われた。本節では入射角度  $0^\circ$  で境界の有無による性能評価を行うため、用いた Aerogel は異なるが 5.5 節で性能評価を行った最高性能に達したデータと比較した。最高性能に達したデータの設定では Aerogel の境界は無く、ビームが Aerogel の中心付近に入射するようなセットアップになっている。

Aerogel の境界が中心にあり、そこにビームを入射させた時の得られたリングイメージとチェレンコフ角度分布は図 5.29 のようになった。これより、境界にビームが照射されてもきちんとリングイメージが確認できることが分かった。そして A-RICH 検出器の性能は、光電子数が 11.34、バックグラウンドが 2.44、角度分解能/track が 4.36 mrad となり  $K/\pi$



識別能力が $5.27\sigma$ となった。

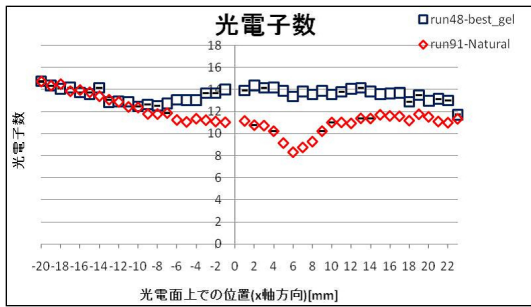
また図 5.30 に境界に入射させた時と、そうでない時のデータを載せ、A-RICH 検出器の性能結果を示した。どのグラフも青マークが最高性能に達したデータであり、赤マークが境界にビームを入射させたデータである。バックグラウンド数はどちらのデータも大きな差は無かった。しかし、光電子数,角度分解能, $K/\pi$  識別能力では x 軸 0mm ~ 14mm 付近で大きな違いが表れた。これより、最も性能が悪くなっている+6 mm 付近に Aerogel の境界があると考えられる。座標軸  $x=0$  の位置が境界の位置でもあったと考えていたが、セットアップをする際に Aerogel は自らでセットするため多少のずれが生じてしまったことで、+6 mm に境界があると思われる性能悪化が見られた。



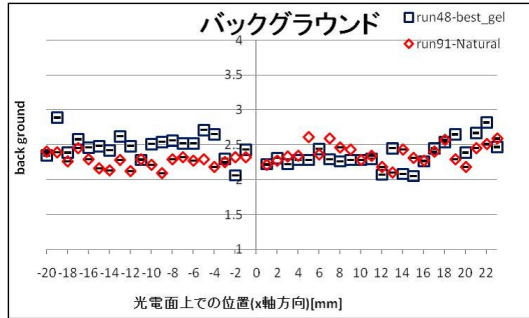
(a) リングイメージ

(b) チェレンコフ角度分布

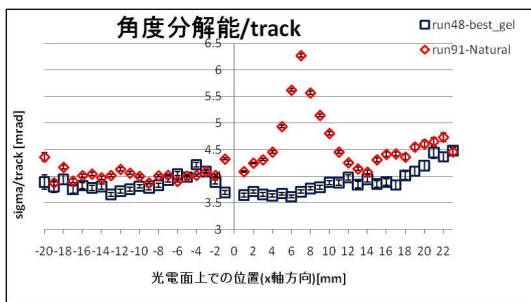
図 5.29: Aerogel 境界がある場合に得られたリングイメージとチェレンコフ角度分布



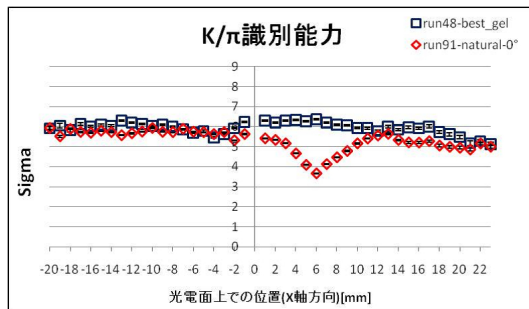
(a) 検出光電子数



(b) バックグラウンド



(c) 角度分解能/track



(d) K/π 識別能力

図 5.30: Aerogel 境界の有無による A-RICH 検出器の性能

Aerogel の境界については、ビームの入射角度をつけて ( $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ) 入射させた測定、境界面の種類を変化させた (Natural surface, WaterJet surface, WaterJet surface+Black Paper の 3 種類を用意した。) 測定も行った。今後は、これらの解析を行い Aerogel の境界にビームが入射した場合に受ける A-RICH 検出器の性能をさらに詳しく評価していく必要がある。

## 第6章 結論

Belle 実験では  $B \rightarrow J/\psi K_s$  への崩壊過程において CP 対称性の破れを観測していて、小林・益川理論の詳細な検証とさらに標準理論を超える新しい物理の探索を展望に加速器及び検出器のアップグレード計画が進行中である。当研究室では、Belle 実験の ACC グループに属し、A-RICH の開発をしている。ACC の識別運動量領域は 0.5 ~ 2.0 GeV/c となっていて高運動量領域の識別が不可能となっているが、A-RICH へアップグレードすることによって識別運動量領域を 4.0 GeV/c まで上げることができる。また、運動量 4 GeV/c までの K と  $\pi$  に対し、 $4\sigma$  以上の識別能力を目標としている。

本研究では光検出器の HAPD の性能試験を行った後に、実装を想定したプロトタイプ A-RICH を製作し、HAPD と ASIC の統合試験として富士テストビームライン (KEK) にて運動量 2 GeV/c の電子ビームを照射し、A-RICH 検出器の性能を評価した。HAPD の性能試験では、ノイズレベル, Total gain, S/N 比, 1・2 次元スキャンの評価を行った。

ビーム照射実験で使用された HAPD の性能試験を行い、1 サンプルについてはビーム照射前後に測定を行っている。その結果、平均 Total gain は  $6.02 \times 10^4$ 、平均 S/N 比は 7.99 となった。全サンプルにおいて単光子検出可能であることも確認した。また、1・2 次元スキャンによって HAPD 全面の位置応答性や dead ch を確認し、各サンプルによってバラつきが生じていることが分かった。HAPD は更なる性能向上に向けて、光電面や APD の改良が行われている。

ビーム照射実験では Focusing タイプの Aerogel、扇型配置にした 6 個の HAPD、ASIC を用いたプロトタイプ A-RICH 検出器を製作し、運動量 2 GeV/c の電子ビームを照射し、チェレンコフリングイメージの観測、チェレンコフ角度分布の取得を行った。また光電子数、バックグラウンド、角度分解能を解析して検出器としての性能評価を行った。

2008 年に行われたビーム照射実験との比較として、Focusing 3 層の Aerogel と High QE に改善された HPAD を使用した。その結果、光電子数 6.9(08 年) から 9.7(09 年) へ 1.4 倍の

向上、運動量 4GeV/c での K/ $\pi$  識別能力は  $4.1\sigma$  から  $5.9\sigma$  へ大幅な向上がみられた。これらの向上の理由として、使用した HAPD の平均 QE が 1.12 倍に改良されたことや HAPD の配置を整列配置から扇型配置にしたことで Acceptance が 1.21 倍になったことが考えられる。

2009 年のビーム照射実験で A-RICH 検出器の性能が最高の結果を出した解析では、Focusing タイプ 2 層の Aerogel と HAPD を扇型配置にした。リングイメージがはっきりと確認され、検出光電子数が 13.5 という 1track でも十分にリングイメージを観測することが出来ることが分かった。K/ $\pi$  識別能力は  $5.91\sigma$  という高い性能が得られた。

Belle 検出器に実装することを考え、ビームに入射角度  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  をつけた場合の検出器の性能を評価した結果、全ての角度においてリングイメージが観測でき、識別能力も  $5\sigma$  以上が得られた。また、実装すると Aerogel を大量に並べるために生じてしまう境界にビームを入射させた場合の検出器の性能を評価する必要がある。まず境界の有無による性能への影響の評価を行った。その結果、境界がある場合でもはっきりとリングイメージが得られ、HAPD 面上で条件を付け詳細な性能評価を行ったところ境界有りの場合に性能の悪化が見られた。しかし、悪化した原因や性能の振る舞いに関して理解が不十分であるためはっきりとした説明は為されていない。

今後、Aerogel 境界が及ぼす影響についての理解を深めるために入射角度をつけた測定や Aerogel の境界面を変更させた測定を解析していく必要がある。そして、悪化させる原因や Aerogel の境界付近で起こる現象について検討する必要がある。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、厳しくもありやさしくもある助言やご指導して下さいました渋谷寛教授と小川了教授には心から感謝を申し上げます。どうもありがとうございました。研究への姿勢や多くの知識を学ぶことができました。また、Belle 実験に参加する機会を与えてくださり深く感謝いたします。

高エネルギー加速器研究機構の足立一郎先生、西田昌平先生からは、研究や実験に至るまで多くのご助言・ご指導をいただき感謝いたします。ACC グループのスタッフ皆様、大学院生皆様からも多くのご指導・ご助言をいただき、ありがとうございました。名古屋大学の椎塚晋さん、首都大学東京の黒田英諒さん、東邦大学の澤藤奈津子さんには HAPD の測定方法を 1 から丁寧に教えて頂き、多くの指導やアドバイス、卒業後も連絡を取って頂き、ありがとうございました。またビームテスト、学会、修士論文と KEK での研究を共有してきた首都大学東京の岩田修一君、名古屋大学の今村美貴さんには大変お世話になりました。大学が異なるため中々会う事が出来ませんでした。実験方法や解析の仕方、困った時にはたくさん相談に乗ってくれてすごく心強い仲間が出来て、とても嬉しかったです。迷惑をかけてしまったこともありましたが、支え続けてくれた事に感謝します。本当にありがとうございました。ACC グループの一員になれたことが本当に嬉しく思います。

普段の研究生活、実験面では 4 年生の時から基礎物理学研究室のみなさんにも大変お世話になりました。4 年生の高橋一仁君、修士課程の森和香奈さんにはドリフトチェンバーの研究でとてもお世話になりました。先輩の立場として反省する点多々ありますが、一緒に研究・議論が出来て良かったと思いますし、熱心に研究に取り組む姿に私も励まされました。

博士課程の松尾友和さん、石田拓運さん、修士課程の小暮大輔君、辻川弘規君、土田勇介君には普段の研究室生活においてお世話になりました。4 年生の角田環美さん、梶原崇史君、小関真吾君、鈴木平君、須藤純君、曾根原舞さん、前田悟史君達とはじっくりお話しする機会が少なかつたけれど気軽に話しかけてくれて、ありがとうございました。皆と

一緒になった1年間は明るく楽しく過ごせました。

そして、大学4年生から共に過ごしてきた修士課程の安生純君、普段の生活からゼミ、卒業研究等さまざまな面においてお世話になり、ありがとうございました。皆さんのおかげで、大学4年生から修士2年までとても楽しい充実した研究室生活が送れました。本当にありがとうございました。

## 参考文献

- [1] T.Ijima et al., Nucl Instr Meth A.502(2003) 231-235.
- [2] T.Matsumoto et al., Nucl Instr Meth A.521(2004) 367-377.
- [3] T.Ijima et al., Nucl Instr Meth A.548(2005) 383-390.
- [4] I.Adachi et al., Nucl Instr Meth A.580(2007) 1042-1045.
- [5] I.Adachi et al., Nucl Instr Meth A.581(2007) 415-418.
- [6] BELLE HOME PAGE , available from <<http://belle.kek.jp>>.
- [7] Super KEK B-factory HOME PAGE , available from <<http://superb.kek.jp/>>.
- [8] 浜松ホトニクス社 電子管事業部 , HAPD72 × 72/C-M144 TEST DATA SHEET
- [9] 朝倉邦造 素粒子物理学ハンドブック (2010).
- [10] 野間佐和子 大学院素粒子物理 1(1999 第 2 版発行).
- [11] 真木晶弘 高エネルギー物理学実験 (1997).
- [12] 原康夫 素粒子物理学 (2003).
- [13] 海野祐士 千葉大学自然科学研究科 修士論文 (1999).
- [14] 大竹晋造 東邦大学理学研究科 修士論文 (2004).
- [15] 岩淵真也 東邦大学理学研究科 修士論文 (2005).
- [16] 宮沢優一 東京理科大学理工学研究科 修士論文 (2007).
- [17] 黒田英諒 首都大学東京理工学研究科 修士論文 (2009).

[18] 椎塚晋 名古屋大学 修士論文 (2009).

[19] 澤藤奈津子 東邦大学理学研究科 修士論文 (2008).



## 付録A HAPD性能試験補足

本文に記載できなかった HAPD , A-RICH 検出器の性能試験の補足について記す。

### A.1 エレクトロニクス類の操作方法

使用したエレクトロニクス類を表 A.1 にまとめ、エレクトロニクスの操作方法に関して述べる。

表 A.1: 使用したエレクトロニクス類 (本文より転載)

HV	CAEN Mod.N570
ガード・バイアス電源	2CH PROGRAMMABLE POWER SUPPLY CAEN Mod.N470
プリアンプ	4CH PROGRAMMABLE POWER SUPPLY Clear Pulse 580K
シェーパー	Clear Pulse 4417
オシロスコープ	Tektronix TDS 3014B
ファンクションジェネレーター	WAVE FACTORY 30MHz MULTIFUNCTION GENERATOR WF1973
LED	420nm
ADC	Amptek Pocket MCA

#### \*HV 電源 (CAEN)

操作は数字キーで行う。主な操作を以下に述べる。

F + 0 + \* → チャンネル選択

F + 1 + \* → HV セット

F + 6 + \* → 電圧モニター

F + 7 + \* → 電流モニター

F + 10 + \* → HV on(その後にトグルスイッチを上げる)

F + 11 + \* → HV off(その後にトグルスイッチを下げる)

F + 13 + \* → Alarm 解除

#### ★ プリアンプ

INPUT に HAPD からの信号, OUTPUT からはプリアンプで増幅された信号が出力される。OUTPUT の隣にはテストパルス入力部 (TEST と表記) があり、テストパルスにて実験を行うときはここに信号を入力する。

#### ★ シェーパー

INPUT にはプリアンプからの OUTPUT を入力する。POLARITY(極性) は NEGATIVE にし、プリアンプで増幅された信号を反転させる。COARSE GAIN, FINE GATE, TIME OFFSET の 3 つの目盛りは最小にし、OFFSET は正極に最大になるようにマイナスドライバーで調整する。

#### ★ MCA

INPUT には ADC 分布をとる信号を入力する。GATE 入力部は INPUT 入力の後ろ側 (反対側) にあるが、GATE 信号がなくても動作させることは可能<sup>1</sup>。GATE 信号は矩形であればよくて、GATE1 に入力した場合は矩形波が立ち下がっている範囲、GATE2 に入力した場合は逆に立ち上がっている範囲の ADC 分布を取る。MCA は peak sensitive type で信号のピーク値 (振幅値) をデジタル値に変換する。また、測定の設定はスイッチ:5V , MCA GAIN:1024 , first を基本として使用した。

---

<sup>1</sup>その場合、すべての入力信号の範囲に対しての ADC を取る

## A.2 各サンプルのゲイン測定結果

ビーム照射実験で使用した後に測定した5サンプルのゲインとS/N比の結果を以下にまとめます。

### A.2.1 SHP0070

表 A.2: SHP0070 の試験結果 (2010/10)

chip	bias[V]	HV[V]	total gain@KEK	S/N
A-22	331	8500	62340	10.86
B-29	331	8500	52920	6.97
C-22	337	8500	93500	8.22
D-22	343	8500	83660	9.94

### A.2.2 SHP0077

表 A.3: SHP0077 の試験結果 (2010/09)

chip-ch	bias[V]	HV[V]	total gain@KEK	S/N
A-22	340	8500	64760	5.00
B-22	330	8500	59540	5.45
C-22	330	8500	49190	4.50
D-22	360	8500	68360	5.68

### A.2.3 SHP0117

10月の測定で chipA が noisy<sup>2</sup>となり、単光子検出ができない状態になってしまった。

表 A.4: SHP0117 の試験結果 (2010/10)

chip	bias[V]	HV[V]	total gain@KEK	S/N
A-22	300	8500	-	-
B-22	412	8500	66810	7.96
C-22	403	8500	57700	7.86
D-22	400	8500	61510	8.00

<sup>2</sup>ビーム照射実験後の測定の結果、leak current が流れすぎていることが分かった。

#### A.2.4 SHP0118

表 A.5: SHP0118 の試験結果 (2009/11)

chip	bias[V]	HV[V]	total gain@KEK	S/N
A-22	375	8500	37550	6.74
B-22	406	8500	64320	11.73
C-22	394	8500	56270	8.49
D-22	390	8500	48440	13.10

#### A.2.5 SHP0120

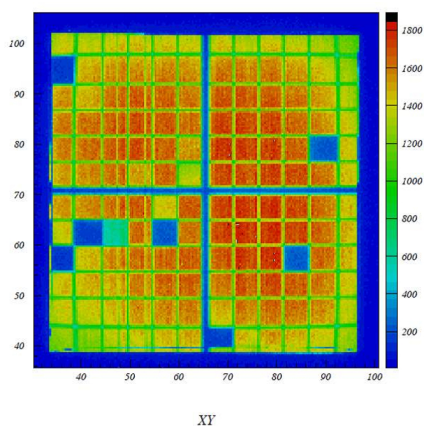
表 A.6: SHP0120 の試験結果 (2010/08)

chip	bias[V]	HV[V]	total gain@KEK	S/N
A-22	403	8500	63040	5.51
B-22	394	8500	48180	4.28
C-22	403	8500	53450	4.11
D-22	380	8500	41170	3.56

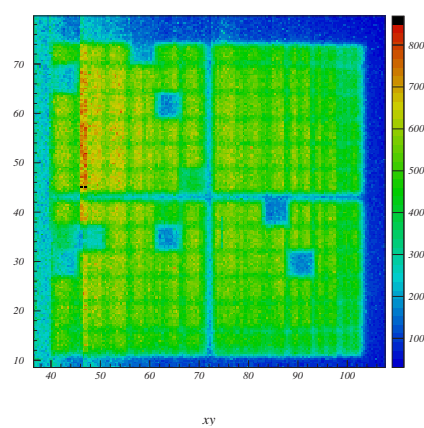
### A.3 ビーム照射実験前後における各サンプルの2次元スキャン測定

ビーム照射実験で使用した HAPD のサンプルの中でビーム照射実験前後に2次元スキャンを行ったものがある。その結果を以下にまとめる。

### A.3.1 SHP77



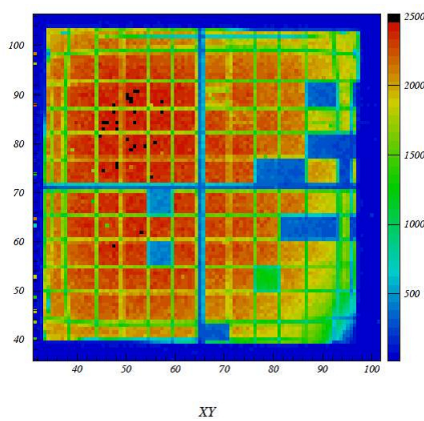
(a) 照射実験前の 2D スキャン



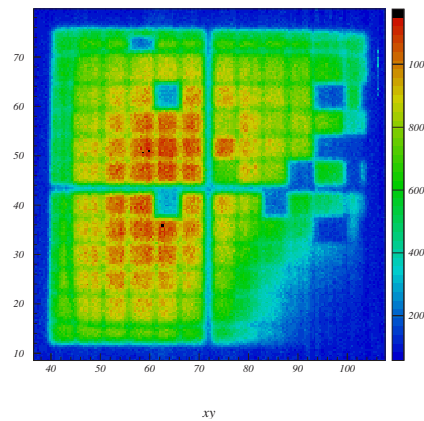
(b) 照射実験後の 2D スキャン

図 A.1: ビーム照射実験前後の shp77 の結果

### A.3.2 SHP118



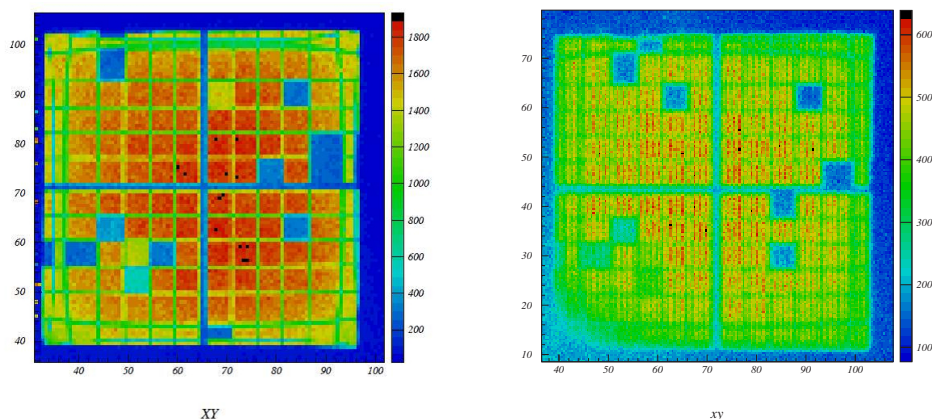
(a) 照射実験前の 2D スキャン



(b) 照射実験後の 2D スキャン

図 A.2: ビーム照射実験前後の shp118 の結果

### A.3.3 SHP120



(a) 照射実験前の 2D スキャン

(b) 照射実験後の 2D スキャン

図 A.3: ビーム照射実験前後の shp120 の結果

## A.4 1次元,2次元スキャンの測定手順

毎回 Par を走らせてから、Daq , Scan を走らせる。

1. ステージ , レーザー , VME , PC の電源を ON にする。
2. エレクトロニクス電源を ON にする。
3. ステージが自動で動くかどうかを確認する<sup>3</sup>。

コントローラーでステージを HOST の状態にし、 /home/hvala/samo/sigma のディレクトリ内でコマンド : ./sigma \_ c \_ 浜松ホトニクス (株) が決めた英字 + Ent または、 ./sigma \_ g \_ 移動させたい x 座標の数値 \_ 移動させたい y 座標の数値 + Ent を実行させる。

表 A.7: 浜松ホトニクス (株) が決めた英字と HAPD-ch の対応

英字	A	a	B	b	C	c	D	d
HAPD-ch	A-36ch	A-4ch	B-24ch	B-27ch	C-1ch	C-8ch	D-36ch	D-15ch

<sup>3</sup>ここで Shutt down されていた PC &VME を立ち上げる場合は、一番初めに初期準備のコマンドを打ち込む必要がある。コマンドについては後に記述する。

4. HAPD , HV , ファイバー等暗箱の中のセッティングをし、箱をバンドで閉じる。この時、レーザーの透過板とレンズの間に黒布を挟み、光が出ないようにする。
5. ASIC に電源供給する (KENWOOD POWER SUPPLY PWR18-1.8Q の output を押す)。
6. 測定画面を表示させる : /home/hvala/samo/magtest に入り、そこで ./sch +Ent を実行させると図 A.4 の測定画面が出てくる。

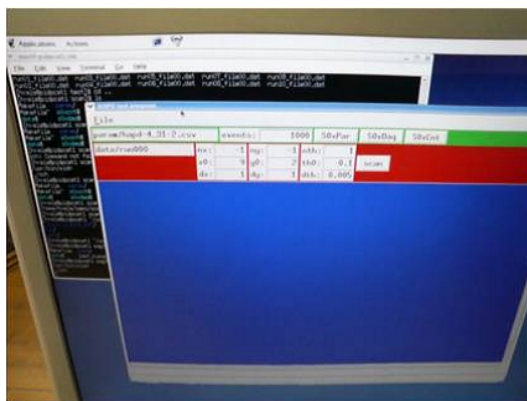


図 A.4: 測定画面

7. S0xPar をクリックし、ASIC のパラメータを取得する。
8. S0xDaq をクリックしテスト信号を送らせる。そして、オシロスコープで波形を確認しながら Gard 電圧<sup>4</sup> → Bias 電圧<sup>5</sup>の順で印加する。
9. **Threshold Scan** をする (レーザーは黒布を挟んでいるので光は照射されていない, HV は印加しない状態)。
  - ① 以下の設定で scan をクリックし測定開始。

<sup>4</sup>200V or 220V(印加電圧は各 HAPD の仕様書に記述。)

<sup>5</sup>アバランシェゲインが ×40 の電圧を印加.noisy な場合は下げる。

表 A.8: Threshold scan の設定

param/hapd-4_31-2.csv					
data/run_△△△				event : 5000	
nx	-1	ny	-1	nth	126
x0	1	y0	1	th0	-0.2
dx	1	dy	1	dth	0.004

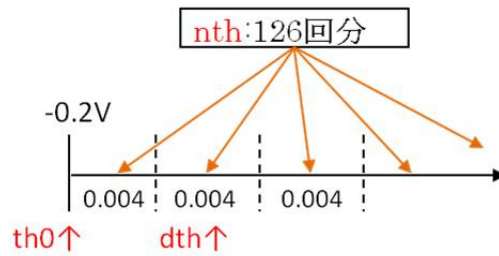


図 A.5: th 設定の説明 (上例の場合)

- ② 測定が終わったら /magtest/hapd に入り、./hapdc\_ run\_ △△△ を実行して hbook ファイルを作製する。  
◇ グラフ作製は /hapd のディレクトリ内で行う ◇
- ③ Paw + Ent で Paw を開いて run\_ △△△ のデータを読み込む。(立ち上がらないときは、コマンド : tcsh を実行させてから Paw を立ち上げる。)

Paw 中  
 コマンド : fl\_ hbook/run\_ △△△



④

Paw 中

exe \_genpar + Ent を実行させる。

→18 個ほどの Gaussian に似た分布が表示されるので終わるまで Ent を押す。

→ /magtest/hapd のディレクトリに hapd-4\_r-2.csv というファイルが出来る。

⑤ /magtest/hapd 内で mv \_ hapd-4\_r-2.csv \_ hapd-4\_r△△△-2.csv を実行し名前を変更する。

⑥ 変更したファイルを/magtest/param に

コマンド : mv \_ hapd-4\_r△△△-2.csv ../param/ で移動させる。

→ コマンド : ls \_ ../param/ \_ -l で移動できているかを確認する。

⑦ 測定画面の param の欄を変更したファイルに書き換え、同じ設定で測定する。  
(param/hapd-4\_31-2.csv の所を param/hapd-4\_r△△△-2.csv にする。)

→ この後に S0Par をクリックすると fa しか出なかった所が b,c 等が出てくるようになる。

⑧

Paw 中

測定したデータを Paw に読み込み (コマンド : fl \_ hbook/run\_ △△△)、  
exe \_ hapd#thscan を実行してグラフを作製する。

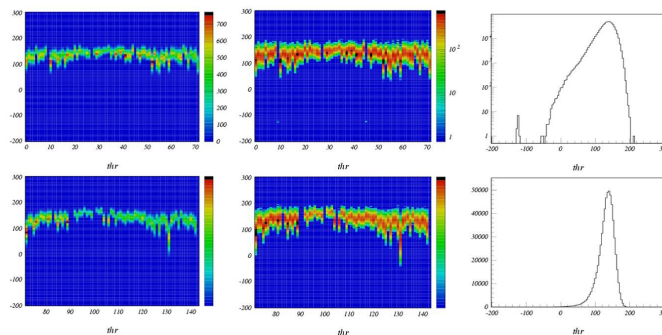


図 A.6: この作業で得られるグラフ (3 枚)

→ グラフの y 軸が 180~200V の辺りでほぼ一直線になるか確認する。(下に伸びているのはノイズが大きいことを示す。Bias 電圧を下げることで対処する。)  
 → だいたい一列になっていて、ノイズも解消できたら OK。  
 ただし測定中に Bias 電圧を変更した場合は、再度変更した条件で Treshold Scan を取りなおさなければならない。

以降は測定画面の param/~ の所を param/hapd-4\_r△△△-2.csv に変更し測定していく。

#### 10. 光量調整をする。

→ ここでレーザーの黒布を外し、HV を-7kV<sup>6</sup>まで印加する。

① 以下の設定で測定する。

表 A.9: 光量調整の設定

param/hapd-4_r△△△-2.csv					
data/run_			event : 200,000		
nx	-1	ny	-1	nth	1
x0	7	y0	7	th0	0.2
dx	1	dy	1	dth	0.004

② hbook を作製し、

Paw 中

測定した run を読み込み、グラフを作製する (コマンド : h/pl 200 colz)。そして、コマンド : locate で count 数を測定する。

③

Paw 中

hit rate が 10% 以下になるように光量を調整する。低いほど単光子に近い光量になる。  
 → event200,000 なので locate で測定した場合、counts 20,000 以下になっていれば良い。

<sup>6</sup>S0xDAQ をクリックし、波形を確認しながら-5kV まで。その後徐々に印加する。

- ④ 光量が安定しているかどうか数回、時間をおいて測定し count 数を調べる。  
→ 誤差内 ±1000 程度で安定ならば OK。

11. 中心点の設定 & 測定をする。

- ① ステージを目視で HAPD の中心に合わせ、中心座標を確認する。
- ② /magtest/scan.c と /samo/sigma/sigma.c のプログラム中にある  

$$\left\{ \begin{array}{l} XCENTER \\ YCENTER \end{array} \right\}$$
 の数値を確認した中心座標に変更し、保存する。  
→ ステージに表示される数値は PC 上に書き込む数値の 4 倍になっている。
- ③ 測定画面を一度閉じ、 /magtest と /sigma のディレクトリの場所で  
 コマンド : make を実行し、コンパイルする。  
→ 画面上に  

```
g++ -g scan.o sigma.o ../pts/libpts.a -o scan/home/hvala/n6vme/lib/libn6vme.a
```

 のような出力が出ればコンパイルは成功している。
- ④ 中心点が含まれるような以下の設定で測定する。

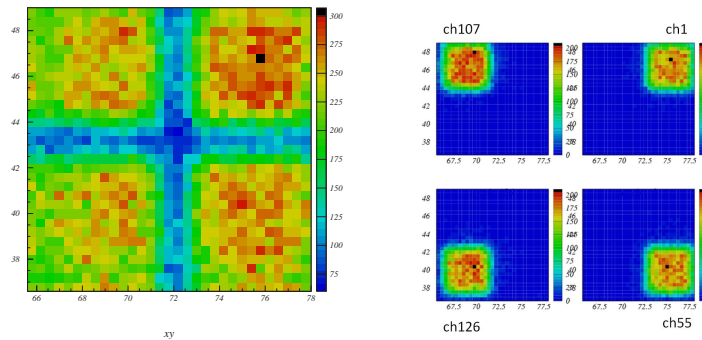
表 A.10: 中心位置の設定

param/hapd-4_r△△△-2.csv					
data/run_			event : 4000		
nx	31		ny	31	nth 1
x0	XCENT -1550		y0	YCENT -1550	th0 0.2
dx	100		dy	100	dth 0.004

- ⑤ hbook ファイルを作製し、

Paw 中

測定した run データを読み込ませ、 h/pl 200 colz + Ent を実行させると図 A.7(a) が出る。(中心が分かれば測定成功)  
 → 200 の所をそれぞれ 1001, 1107, 1126, 1055 に変更すると 1ch ごとにスキャン結果を表示させることが出来る。  
 → locate でグラフから分かる中心座標を確認し、目視の数値と比較する。  
 → 中心座標がずれていたり、グラフに中心が映っていない場合は調整する必要がある。



(a) 中心を含んだ 4ch の測定結果

(b) 1ch ずつの表示結果

図 A.7: 中心位置の測定結果

## 12. 1次元 Scan をする。

本実験では y 軸を固定し x 軸を 1 行動かしたスキャンを行っている (4, 6, 8, 10 行目を選択)。

→ 1 行全ての ch が測定できる行を 4~5 行適当に選んで測定しているが、出来れば 2 次元スキャンの結果から選択する方が良い。

- ① 以下の設定でスキャンする。(位置や配置を変えなければ、基本的にはどの HAPD にも対応できる。)

表 A.11: 1次元 scan の設定

param/hapd-4_r△△△-2.csv		event : 10,000			
data/run_					
nx	88	ny	-1	nth	1
x0	$x_{CENT}-8500$	y0	測定したい行-1	th0	0.2
dx	200	dy	1	dth	0.004

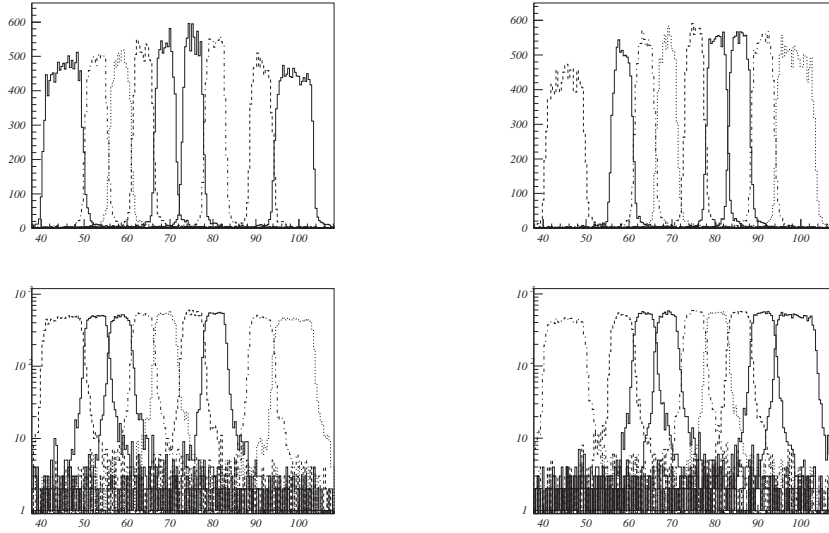
- ② hbook を作製し、

Paw 中

測定した run を読み込み、コマンド : `exe _ hapd#xscan _ row = 測定したい行の数値` を実行しグラフを作る。図 A.8 が出る。  
→ 実行させた後画面に error が出た場合は、再度 Ent を押し実行させる。

- ③ x 軸を固定し、y 軸を一行動かした測定では X0 を測定したい列 -1 にし、Y0 を  $YC_{CENT}-8565$  の数値に設定する。

→ グラフ作成のコマンドは `exe 〴 hapd#yscan 〴 col = 測定したい列 -1 の数値`



(a) 下から 6 行目の測定結果 : C~D の範囲

(b) 下から 8 行目の測定結果 : B~A の範囲

図 A.8: 1次元スキャンの測定結果

### 13. 2次元 Scan をする。

HAPD 全面のスキャンをする。

- ① 以下の設定でスキャンする。(位置や配置を変えなければ、基本的にはどのHAPDにも対応できる。)

表 A.12: 2次元 scan の設定

param/hapd-4_r△△-2.csv		event : 10,000			
data/run_					
nx	178	ny	178	nth	1
x0	$XC_{CENT}-8832$	y0	$YC_{CENT}-8565$	th0	0.2
dx	100	dy	100	dth	0.004

- ② 測定には約 38 時間かかる。測定終了後、hbook を作製し

Paw 中

測定した run を読み込み、コマンド : h/pl 200 colz を実行させる。

図 A.9 のように、HAPD 全体が映ったようなグラフが出来る。

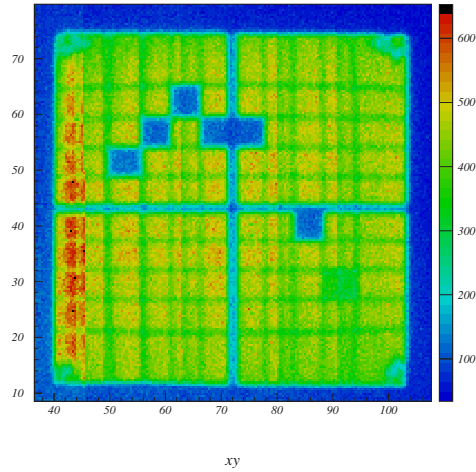


図 A.9: 2次元スキャンの測定結果 (shp70)

---

#### VME の初期準備

- 1 コマンド窓を開き、root 権限に入る。  
→ su - + Ent  
PassWord : pidacc02
- 2 [root@arich07 ~ root] # に入ったら、install\_vmdev.sh + Ent を実行し、exit で root 権限を出る。→ 準備完了

#### STAGE の初期準備

- 1 コマンド : minicom + Ent を実行する。(どの場所で行っても可)
- 2 Ctrl + A + Q で出る。→ 準備完了

## 付録B A-RICH ビーム照射実験の解析と生データの対応

本文の解析内容と解析した生データの ID の対応を各章について記す。

### B.1 実用に向けたプロトタイプ A-RICH 検出器の性能評価

★5.4.1 章 2008 年照射実験 : run225+226

★5.4.2 章 2009 年照射実験の結果: run66

### B.2 最高性能に達したセットアップでの性能評価

★5.5 章 最高性能を示した時の結果: run48

★5.5.1 章 ビームの入射角度に対する評価

表 B.1: 入射角度と run NO. の対応表

入射角度	run NO.
0°	48
15°	77
30°	84

### B.3 Aerogel 境界にビームが入射した場合の性能評価

★5.6.2 章 : 境界の有無による性能評価 (入射角度 0°)

表 B.2: 境界の有無に対する run NO.

境界の有無	run NO.
境界無し	48
境界有り	91