

2018 年度 修士学位論文

Belle II 実験 ARICH 検出器の光反射 ミラー部における粒子識別性能の評価

指導教員 角野 秀一

首都大学東京 理工学研究科 物理学専攻
博士前期課程2年

高エネルギー実験研究室

17879311 柿本詩織

2019年1月10日

概要

茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構では Belle II 実験が今年 4 月から行われている。Belle II 実験は SuperKEKB 加速器を用いて電子・陽電子を加速し衝突させ、大量の B 中間子を生成するルミノシティーフロンティア実験である。B 中間子の崩壊過程を精密に測定することにより標準模型からのズレを観測し、新物理の探索を目的としている。前身の Belle 実験では B 中間子の稀崩壊を測定するにはデータ量が不足していたので、本実験ではルミノシティーを約 50 倍に増やし統計量・精度を向上させる。

Belle II 検出器は各役割に応じた複数の検出器からなる複合型測定器であり、その中でも Endcap 部にある ARICH(Ring Imaging CHerenkov) 検出器は荷電 K/ π 中間子の識別の役割を担う。ARICH 検出器は輻射体であるシリカエアロゲルと光検出器 HAPD (Hybrid Avalanche Photo detector) の 2 層構造になっている。荷電粒子が輻射体を通過する際に円錐状に発生するチェレンコフ光を光検出器 HAPD で 2 次元リングイメージとして検出し、そのリングイメージを再構成することにより粒子識別を行う。

ARICH 検出器では、ARICH 検出器の外周を覆うようにミラー (ガラス素材の反射板) が取り付けられている。トラックが ARICH 検出器の外側の端に入射した際、円錐状に放出されたチェレンコフ光の一部が ARICH 検出器の外側に抜けてしまうためにリングイメージ全体をとらえることができなくなってしまう。そこでミラーを設置することにより ARICH の端にきた光子を反射させ、リングイメージの全体をつかむことができる。

本研究ではミラーがある場合とない場合を比較してどの程度識別効率に差がでるのかを検証し、さらにミラー設置精度 (R 方向に 5mm 移動させた場合) についての識別効率の関係についても確認した。ミラーが正しい位置にある場合と比べ K 中間子の識別効率はどちらも誤差の範囲内だったが、 π 中間子の識別効率についてミラーがない場合は約 6 %、設置精度が悪い場合は約 4 %ほど低下した。そのためミラーは ARICH 検出器に必要であり、またミラー位置のずれの測定と補正を行う必要があることがわかった。さらに本研究ではミラーが本来の位置からずれた際にチェレンコフ角分布にどのような変化があるのかシミュレーションを行うことにより確認した。シミュレーションの結果をもとに 4 月から 7 月に行われた試運転 (phase2) でのデータを解析した結果、ミラーの位置が本来の位置からずれていることがわかった。さらにその位置のずれを考慮してリングイメージを再構成したところ、光速 c と荷電粒子の速度 v の比 (c/v) として計算したチェレンコフ角ピークが 0.998 から 0.999 となり予想値の 1 に近づき、さらにチェレンコフ角ピークの角度分解能についても 4 %減少し改善された。

目次

第 1 章	序論	10
1.1	B 中間子の物理	11
1.1.1	CP 対称性の破れの検証	11
1.1.2	B 中間子の物理	11
1.2	Belle II 実験における新物理探索	16
1.2.1	$b \rightarrow s\gamma$ 崩壊	16
1.2.2	荷電ヒッグス探索	16
1.2.3	本研究の目的	17
	ミラーにヒットした光子の識別能力の評価	17
	ARICH ミラーのアライメント	17
第 2 章	Belle II 実験	19
2.1	SuperKEKB 加速器	19
2.2	Belle II 測定器	22
2.2.1	PXD、SVD	22
2.2.2	CDC	23
2.2.3	TOP	25
2.2.4	Aerogel RICH	26
2.2.5	ECL	26
2.2.6	KLM	27
2.2.7	DAQ	28
第 3 章	ARICH 検出器	29
3.1	ARICH 検出器に要求される性能	29
3.2	粒子識別原理	29
3.2.1	ARICH 検出器の構造と構成要素	30
	輻射体	32
3.2.2	光検出器	33
3.2.3	ARICH 検出器のミラー	36
	ミラーの概要	36
第 4 章	ミラーにヒットした粒子の粒子識別の評価	39
4.1	ARICH 検出器の粒子識別方法	39

4.2	シミュレーション	39
4.2.1	設置精度によるミラー識別効率の評価	40
4.2.2	ミラーがない場合の識別効率の評価	44
第5章	ミラーのアライメント手法の開発	46
5.1	シミュレーションのセットアップ	46
5.1.1	正しい位置にミラーがある場合の Cherenkov 角分布	49
5.1.2	R 方向へのミラーの位置ずれのシミュレーション	49
5.1.3	ϕ 方向へのミラーの回転のシミュレーション	62
5.1.4	θ 方向へのミラーの回転シミュレーション	69
5.2	実データへの適用	77
5.2.1	横軸 ϕ の結果	77
5.2.2	θ 回転の見積もり	78
5.2.3	R 方向へのズレの見積もり	82
5.2.4	Cherenkov 角度分布	86
第6章	結論	87
	参考文献	89

目次

1.1	茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構 (KEK)	10
1.2	非対称エネルギーでの B 中間子生成とその崩壊の概念図	12
1.3	$B^0-\bar{B}^0$ 混合を表す Feynman diagram の例	12
1.4	$B^0 \rightarrow J/\psi K_s$ を表す diagram。上図が B^0 から直接終状態へと崩壊するモード。下図が box diagram を介して \bar{B}^0 へと繊維してから崩壊するモードを表している。	13
1.5	mixing-induced CP violation の概念図。どちらも $J/\psi K_s$ へ崩壊するモード。親粒子が B^0 と \bar{B}^0 の場合で崩壊確率に差が生じるかを検証する。	14
1.6	$B \rightarrow J/\psi K_{s/L}$ における崩壊時間分布の測定結果 (上図) とその結果から得られる CP 非対称度 (下図)。青と赤の線の差を取ったものが $\sin 2\phi_1$ に比例することを利用し ϕ_1 を測定することができる。	15
1.7	$B \rightarrow s\gamma$ 過程の例。左が標準模型遷移、が新物理遷移になっている。	16
1.8	$B \rightarrow \tau \nu$ 過程のファイマンダイアグラム。標準模型では W^\pm の交換でおこるが、荷電ヒッグスが交換に関与すると崩壊分岐比にズレが生じる。	17
2.1	SuperKEKB 加速器	19
2.2	主な加速器実験の重心系エネルギー (CMS) におけるエネルギーとルミノシティによる分類。紫で囲まれたものはルミノシティフロンティア実験、青で囲まれたものはエネルギーフロンティア実験に該当する。	20
2.3	Nano-Beam 方式の概念図	21
2.4	Belle II 検出器の概念図	22
2.5	崩壊点検出器のイメージ図	23
2.6	PXD、SVD の各層の配置図。検出可能範囲は $17^\circ < \theta < 150^\circ$ となっている。	23
2.7	粒子別の運動量とエネルギー損失 dE/dx の関係。	24
2.8	Belle 実験、Belle II 実験の CDC の断面図の比較。	24
2.9	DIRC の検出原理	25
2.10	TOP モジュールの概要図	25
2.11	MCP-PMT	26
2.12	ECL モジュールの概要図。ECL 用のクリスタルと 1 ユニットの構成。	27
2.13	KLM の断面図	27
2.14	Belle II 実験のデータ収集システムの概要図	28
3.1	Chererkov 光発生原理の概要図	29

3.2	ARICH 検出器の粒子識別方法の概念図	30
3.3	ARICH 検出器の構造図	31
3.4	ARICH の設計図	31
3.5	シリカエアロゲル。レイリー散乱のため表面が青くなっている。	32
3.6	シリカエアロゲルの内部構造	32
3.7	デュアルレイヤー方式の概念図	33
3.8	左図 : HAPD の外観。右図 : HAPD の寸法	34
3.9	HAPD の動作原理	35
3.10	APD の動作原理	35
3.11	ミラーを設置すると外層壁へ到達した Cherenkov 光を反射させることにより光子数を維持することができる。	36
3.12	ARICH のミラー。ARICH 検出器の端を覆うように取り付けられている。	37
3.13	波長と反射率の関係	38
4.1	理想的な位置にある場合の K 中間子についてのシミュレーション結果	40
4.2	理想的な位置にある場合の π 中間子についてのシミュレーション結果	41
4.3	R 方向へ 5mm ずらした場合の K 中間子についてのシミュレーション結果	42
4.4	R 方向へ 5mm ずらした場合の π 中間子についてのシミュレーション結果	43
4.5	反射率=0 の場合の K 中間子についてのシミュレーション結果	44
4.6	R 方向へ 5mm ずらした場合の π 中間子についてのシミュレーション結果	45
5.1	アライメントに用いるパラメーターの定義	47
5.2	アライメントに用いるパラメーターの定義	48
5.3	ミラーが正しい位置にある場合の Cherenkov 角分布	49
5.4	ミラーが +R 方向 (外側) へずれたときの概念図。外側にずれるとチェレンコフ角は小さく再構成されると予測される。	50
5.5	R 方向へ移動させたときのシミュレーション結果	51
5.6	各 2 次元ヒストグラムの横軸を 10 分割し各スライスについて縦軸の $n\cos\theta_c$ 分布をフィットした結果のピーク値のグラフ	52
5.7	R 方向へ移動させたときのシミュレーション結果	53
5.8	+R 方向へ各 2 次元ヒストグラムの横軸を 10 分割し各スライスについて縦軸の $n\cos\theta_c$ 分布を、フィットした結果のピーク値のグラフ	54
5.9	各移動についての σ Cherenkov 角分布の Fit 図	55
5.10	-R 方向へ移動させたシミュレーション結果	56
5.11	-R 方向への各 2 次元ヒストグラムの横軸を 10 分割し各スライスについて縦軸の $n\cos\theta_c$ 分布を、フィットした結果のピーク値のグラフ	57
5.12	-R 方向へ移動させたときのシミュレーション結果	58
5.13	-R 方向への各 2 次元ヒストグラムの横軸を 10 分割し各スライスについて縦軸の $n\cos\theta_c$ 分布を、フィットした結果のピーク値のグラフ	59
5.14	各移動についての σ Cherenkov 角分布の Fit 図	60

5.15	R 方向への各移動のズレをパラメータ化したグラフ	61
5.16	ミラーが +phi 方向へ回転したときの概念図。	62
5.17	ϕ 方向へ時計回りに回転させたシミュレーション結果	63
5.18	各 2 次元ヒストグラムの横軸を 10 分割し各スライスについて縦軸の $n \cos \theta_c$ 分布を、フィットした結果のピーク値のグラフ	64
5.19	各回転についての σ Cherenkov 角分布の Fit 図	65
5.20	ϕ 方向へ反時計回りに回転させたシミュレーション結果	66
5.21	$-\phi$ 方向への各 2 次元ヒストグラムの横軸を 10 分割し各スライスについて縦軸の $n \cos \theta_c$ 分布を、フィットした結果のピーク値のグラフ	67
5.22	各回転についての σ Cherenkov 角分布の Fit 図	68
5.23	ミラーが +theta 方向へ回転したときの概念図。	69
5.24	θ 方向へ反時計回りに 1mm~5mm 回転させたシミュレーション結果	70
5.25	+ θ 方向への各 2 次元ヒストグラムの横軸を 10 分割し各スライスについて縦軸の $n \cos \theta_c$ 分布を、フィットした結果のピーク値のグラフ	71
5.26	各回転についての σ Cherenkov 角分布の Fit 図	72
5.27	theta 方向へ反時計回りに-1mm~-5mm 回転させたシミュレーション結果	73
5.28	$-\theta$ 方向への各 2 次元ヒストグラムの横軸を 10 分割し各スライスについて縦軸の $n \cos \theta_c$ 分布を、フィットした結果のピーク値のグラフ	74
5.29	各回転についての σ Cherenkov 角分布の Fit 図	75
5.30	フィットした傾きと回転のグラフ	76
5.31	実データでの横軸 ϕ の各ミラーにおける $n \cos \theta_c$ 分布	77
5.32	実データでの横軸 z の各ミラーにおける $n \cos \theta_c$ 分布	78
5.33	各ミラーを Y 軸へプロジェクションし、フィットした結果のピーク値のグラフ	79
5.34	補正後の横軸 z の各ミラーにおける $n \cos \theta_c$ 分布	80
5.35	各ミラーを Y 軸へプロジェクションし、フィットした結果のピーク値のグラフ	81
5.36	実データでの横軸 $\cos \theta$ の各ミラーにおける $n \cos \theta_c$	82
5.37	各ミラーを Y 軸へプロジェクションし、フィットした結果のピーク値のグラフ	83
5.38	補正後の横軸 $\cos \theta$ の各ミラーにおける $n \cos \theta_c$	84
5.39	各ミラーを Y 軸へプロジェクションし、フィットした結果のピーク値のグラフ	85
5.40	アライメント前後での Cherenkov 角分布	86

表目次

2.1	SuperKEKB の加速器と KEKB 加速器の主なパラメーター	21
3.1	HAPD の仕様	34
3.2	ミラーの仕様	37
4.1	識別効率と誤識別率	40
4.2	識別効率と誤識別率	41
4.3	識別効率と誤識別率	42
4.4	識別効率と誤識別率	43
4.5	識別効率と誤識別率	44
4.6	識別効率と誤識別率	45
5.1	シミュレーションのパラメーター	46
5.2	各 2 次元ヒストグラムの横軸を 10 分割し各スライスについて縦軸の $n\cos\theta_c$ 分布の、ピーク値をフィットした直線値と誤差	52
5.3	傾きと誤差	54
5.4	移動に対する σ の値	55
5.5	-R 方向への各 2 次元ヒストグラムの横軸を 10 分割し各スライスについて縦軸の $n\cos\theta_c$ 分布を、ピーク値をフィットした直線値と誤差	57
5.6	傾きと誤差	59
5.7	移動に対する σ の値	60
5.8	直線値と誤差	64
5.9	回転に対する σ の値	65
5.10	直線値と誤差	67
5.11	回転に対する σ の値	68
5.12	傾きと誤差	71
5.13	回転に対する σ の値	72
5.14	傾きと誤差	74
5.15	回転に対する σ の値	75
5.16	傾きと誤差	79
5.17	ミラーの θ 方向への回転	80
5.18	傾きと誤差	81
5.19	傾きと誤差	83

5.20	傾きと誤差	84
5.21	傾きと誤差	85
5.22	補正前後のピーク値と σ の値	86

第 1 章

序論

1999 年から 2010 年まで、茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構 (KEK、図 1.1) で Belle 実験 [1] が行われた。この実験は電子・陽電子非対称エネルギー衝突型加速器である KEKB 加速器を用いて大量の B 中間子を生成し、その崩壊過程を Belle 検出器で観測することにより B 中間子系における CP 対称性の破れを検証し、小林・益川模型を証明した。また、標準模型では説明できない新物理の兆候の発見など数多くの成果を挙げた。Belle II 実験 [2] は検出器・加速器を Belle 実験から改良しより大統計・高精度の測定で新物理の兆候を探索する実験である。2018 年 4 月に初のビーム衝突が行われた。この章では B 中間子の物理と Belle II 実験で期待されている新物理について述べる。



図 1.1 茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

1.1 B 中間子の物理

1.1.1 CP 対称性の破れの検証

1964年に J.W.Cronin、V.L.Fitch らが中性 K 中間子系の $CP = -1$ の固有状態と考えられていた K_L から、CP 対称性の保存のため崩壊されないと考えられていた $2\pi(CP = +1)$ への崩壊を観測し、世界で初めて K 中間子における CP 対称性の破れを観測した。[3]

1973年に CP 対称性の破れを説明する理論の一つとして小林誠と益川敏英によって小林・益川模型 [4] が提唱された。これまで3種類 u, d, s クォークのみでクォーク模型を構築していたが、この理論では3世代6種類 u, d, c, s, t, b クォークを導入し、それらのフレーバー固有状態と質量固有状態の変換行列である CKM 行列中に複素位相が一つ以上含まれていると CP 対称性が破れていることが示される。特に b クォークに関する行列要素である (V_{tb}) が大きな値を持ちかつ後術の $B^0\bar{B}^0$ 混合による行列要素 V_{td} や b クォークから ν クォークへの遷移による行列要素 $V_{\nu b}$ に CP を破る位相を持つことが期待されたため、 b クォークを含む粒子の中で比較的生成が容易な B 中間子の CP 非対称度の測定を行うため Belle 実験や Babar 実験といった B ファクトリー実験が行われた。

1.1.2 B 中間子の物理

B 中間子は e^+ と e^- の対消滅によって生じる 10.58GeV の $\Upsilon(4s) = (b\bar{b})$ の bottomonium 共鳴状態が $B^0\bar{B}^0$ に崩壊することを利用し B 中間子を生成する。 B ファクトリー実験では $\Upsilon(4s)$ の質量 $10.58\text{GeV}/c^2$ になるように電子・陽電子の衝突エネルギーが設定されている。Belle II 実験では SuperKEKB 加速器を用いて e^+ を $7.0\text{GeV}/c$ 、 e^- を $4.0\text{GeV}/c$ へ加速させ、衝突させる。生成された B 中間子は $1.5\text{GeV}/c$ 程度の運動量を持ち、ほぼビーム軸に沿って飛行する。その崩壊過程の例を図 1.2 で示す。

また、 $B^0\bar{B}^0$ の崩壊時間差は $O(10^{-12})$ 秒程度のため崩壊時間差を直接測定するのは困難である。この解決方法として考案されたのが「非対称エネルギー衝突」である。この手法は電子・陽電子の衝突を異なる運動量で行うことにより生成される粒子の寿命を Lorentz boost で相対論効果によって延ばす。さらに崩壊時間差を崩壊位置の差に変換すると飛行距離が約 $130 \mu\text{m}$ になるため測定可能となるというものである。

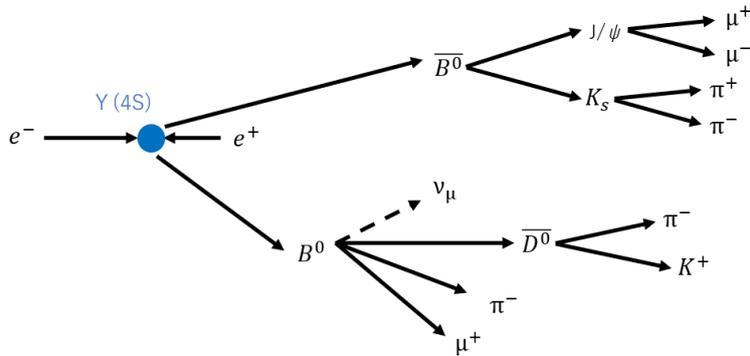


図 1.2 非対称エネルギーでの B 中間子生成とその崩壊の概念図

生成された B 中間子対は box diagram 過程によって常に入れ替わっている。(図 1.3) これを B^0 - \overline{B}^0 混合 (mixing) と呼ぶ。

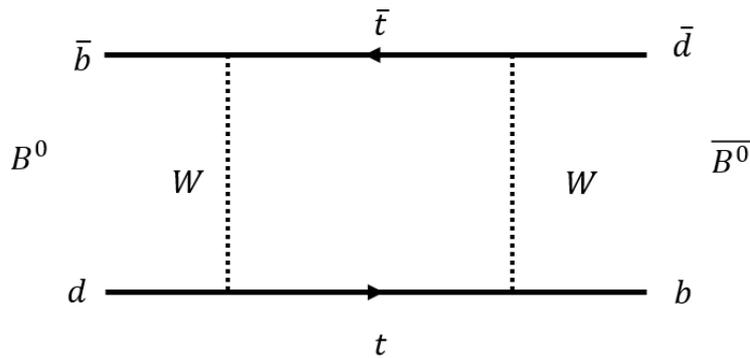


図 1.3 B^0 - \overline{B}^0 混合を表す Feynman diagram の例

ここで CP 対称性の破れ観測の主要な崩壊 $B^0 \rightarrow J/\psi K_s$ について考える。 $J/\psi K_s$ への崩壊は図 1.4 のような tree diagram を経て起こり、 B^0 が直接 $J/\psi K_s$ へと崩壊する過程と、 B^0 が box diagram を介して \overline{B}^0 へと遷移してから $J/\psi K_s$ へと崩壊する 2 種類がある。これらの崩壊は終状態が同じであるため、親粒子の B 中間子がどちらであるかを終状態から同定することはできない。そこで親粒子を同定するために、観測したい $J/\psi K_s$ へ崩壊する側 (signal side) ではなくその反対の崩壊が完全に再構成できる崩壊 (tag side) を正確に測定することで tag side の親粒子を同定する。 B^0 と \overline{B}^0 は対になっているため、片一方が B^0 と同定されるともう片方は必ず \overline{B}^0 と同定できる。このような手法をフレーバータギングと呼ぶ。

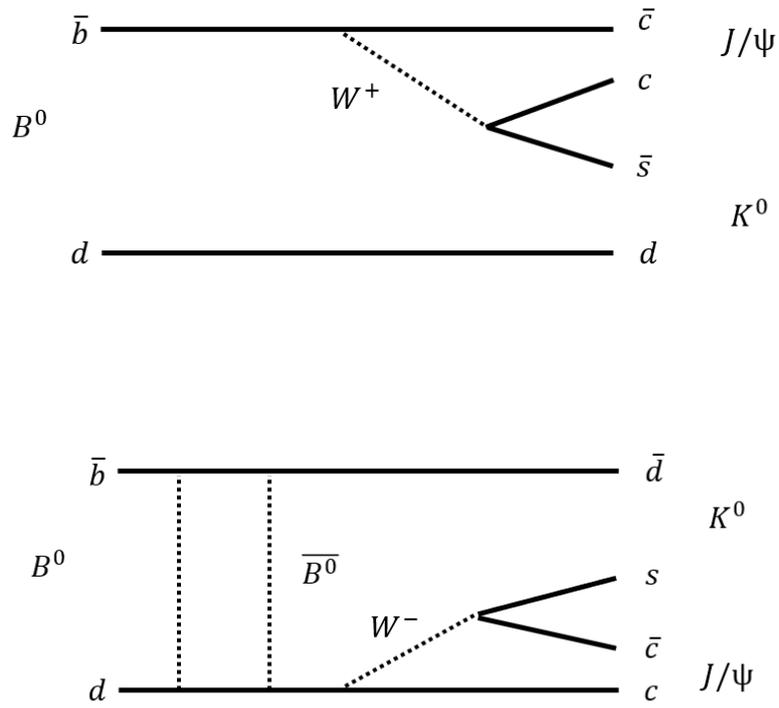


図 1.4 $B^0 \rightarrow J/\psi K_s$ を表す diagram。上図が B^0 から直接終状態へと崩壊するモード。下図が box diagram を介して \bar{B}^0 へと織維してから崩壊するモードを表している。

上図のように2つの経路から同じ状態へ遷移する際には、 B^0 - \bar{B}^0 混合により2つの経路間で量子力学的に干渉し合うため、 B^0 から崩壊する場合と \bar{B}^0 から崩壊する場合で崩壊分岐比が異なる。この崩壊分岐比を測定することで CP 非対称度を測定することができる。signal side の崩壊時間を t_{sig} 、tag side の崩壊時間を t_{tag} とした時、崩壊確率は崩壊時間差 $\Delta t = t_{sig} - t_{tag}$ を用いると式 1.1.2 で表される。

$$\Gamma(B^0 \bar{B}^0_{pair} \rightarrow f_{sig}, f_{tag}) = \frac{e^{-\frac{|\Delta t|}{\tau}}}{4\tau} (1 + q(S \sin(\Delta m \Delta t)) + A \cos(\Delta m \Delta t)) \quad (1.1)$$

ここで q は B 中間子のフレーバー、 τ は B 中間子の寿命、 Δm は B^0 と \bar{B}^0 の質量差、 S と A は CP violation parameter と呼ばれており標準模型におけるモード ($b \rightarrow c\bar{c}s$) では $S = -\xi_f \sin 2\phi_1$ 、 $A = 0$ である。 $J/\psi K^0$ の崩壊における CP 非対称度は式 1.1.2 で表される。

$$\begin{aligned} A_{CP}(\Delta t) &= \frac{\Gamma(\bar{B}^0(t) \rightarrow f_{CP}) - \Gamma(B^0(t) \rightarrow f_{CP})}{\Gamma(\bar{B}^0(t) \rightarrow f_{CP}) + \Gamma(B^0(t) \rightarrow f_{CP})} \\ &= -\xi_{CP} \sin 2\phi_1 \sin(\Delta m \Delta t) \end{aligned} \quad (1.2)$$

B^0 と \bar{B}^0 の $J/\psi K_s$ への崩壊時間分布を示したものが図 1.6 である。



図 1.5 mixing-induced CP violation の概念図。どちらも $J/\psi K_s$ へ崩壊するモード。親粒子が B^0 と \bar{B}^0 の場合で崩壊確率に差が生じるかを検証する。

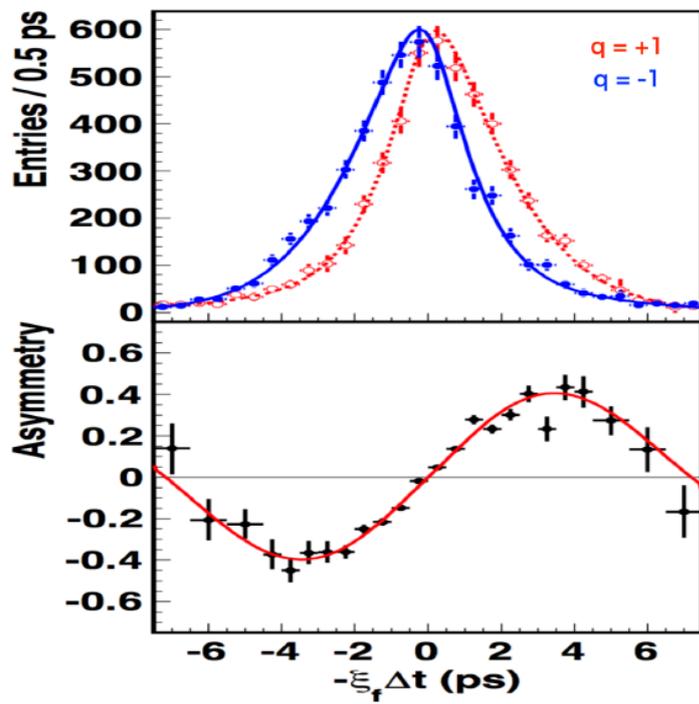


図 1.6 $B \rightarrow J/\psi K_{s/L}$ における崩壊時間分布の測定結果（上図）とその結果から得られる CP 非対称度（下図）。青と赤の線の差を取ったものが $\sin 2\phi_1$ に比例することを利用し ϕ_1 を測定することができる。

1.2 Belle II 実験における新物理探索

1.2.1 $b \rightarrow s\gamma$ 崩壊

$b \rightarrow s\gamma$ 遷移における loop diagram を図 1.7 へ示す。この遷移は電荷が変化せず粒子のフレーバーのみが変化する Flavor Changing Neutral Current(FCNC) と呼ばれる過程である。標準模型の範囲内では tree diagram のみでの崩壊は禁止されており、loop を介した loop diagram で観測される。標準理論に含まれる W の代わりに超対称性粒子や荷電ヒッグスが含まれていると $b \rightarrow s\gamma$ 遷移を含む崩壊分岐比に標準模型とのズレが生じる。この過程は $B \rightarrow X_s\gamma$ 崩壊 (X_s はストレンジを 1 つ含む終状態の総称) の中に現れ、 X_s の終状態には多くの K/π 粒子が含まれる。よって、これらの崩壊モードを精密に観測するためには、高い K/π 識別が求められる。

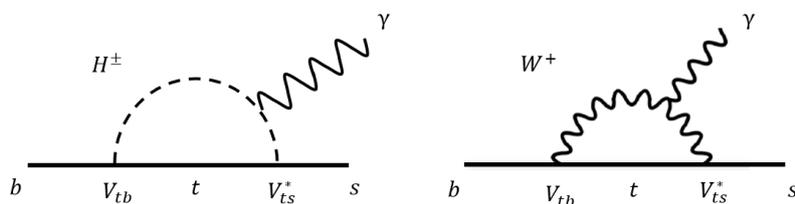


図 1.7 $B \rightarrow s\gamma$ 過程の例。左が標準模型遷移、が新物理遷移になっている。

1.2.2 荷電ヒッグス探索

超対称性理論では標準理論におけるヒッグス粒子の他に中性ヒッグス粒子と電荷をもった荷電ヒッグス粒子が存在すると考えられている。このような現象は B 中間子の稀崩壊である $B \rightarrow \tau\nu$ や $B \rightarrow D \tau\nu$ 崩壊で影響が出やすいとされている。これらの過程は標準理論では W^\pm の交換により起こるとされているが、中間状態に荷電ヒッグスの寄与が加わる場合、標準模型で予測される崩壊分岐比からズレが生じる。

Belle 実験と Babar 実験で測定された崩壊分岐比の世界平均は、標準模型の予想値よりも 1.6σ 程度ずれている。Belle II 実験では、大統計かつ高精度で測定を行うことで新物理の発見を目指している。

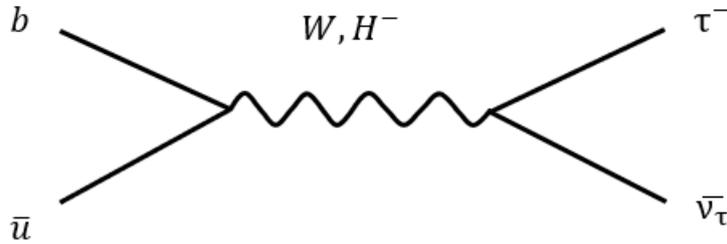


図 1.8 $B \rightarrow \tau \nu$ 過程のファイマンダイアグラム。標準模型では W^\pm の交換でおこるが、荷電ヒッグスが交換に関与すると崩壊分岐比にズレが生じる。

1.2.3 本研究の目的

Belle II 実験で用いられる粒子識別装置 Aerogel Ring Imaging Cherenkov 検出器 (ARICH) はシリカエアロゲル (輻射体) が荷電粒子を通過した際に発生される Cherenkov 光を HAPD (光検出器) で二次元リングイメージとして観測しその放射角を測定することにより荷電 K/π 粒子の識別を行う。ARICH で使用される光検出器 HAPD (Hybrid Avalanche Photo-Detector) は 144ch マルチアノード型検出器であり本番では全部で 420 台使用する。トラックが ARICH の外側に飛来した際に外層壁まで到達した粒子は検出できない。そこで ARICH の外層壁に沿うようにミラー (反射鏡) を設置することで外層壁に到達した Cherenkov 光を反射させ光検出器で観測できるようにする。これにより識別に必要な光子数を維持することができる。

ミラーにヒットした光子の識別能力の評価

ミラーが正しい位置にある場合、ない場合、ARICH の円周方向へ 5mm ずれている場合についてモンテカルロシミュレーションを行った。この結果よりミラーが ARICH の粒子識別に有効であるか、また設置精度により識別効率にどの程度差がでるのかについて確認する。

ARICH ミラーのアライメント

ARICH には外側に飛来した粒子も HAPD で測定できるようミラーが取り付けられている。ミラーが本来の位置からずれたさいに測定結果にどのような影響がでるのかをシミュレーションを行うことにより確認する。その結果を実データに用いてずれている際はソフトウェアに組み込み校正することを目的としている。

第 2 章

Belle II 実験

Belle II 実験では SuperKEKB 加速器を用いて B 中間子などの稀崩壊を大量に観測することにより標準模型を超える新物理の探索を目的とし、前身の Belle 実験の 50 倍の統計量を得るために加速器・測定器の改良を行った。この章では Belle II 実験に使用される superKEKB 加速器と Belle II 検出器とそれを構成する各検出器について説明する

2.1 SuperKEKB 加速器

SuperKEKB 加速器は前身の Belle 実験で使用された KEKB 加速器をアップグレードした KEKB と同様に電子・陽電子非対称エネルギー衝突型加速器である。SuperKEKB 加速器の主な構成を（図 2.1）に示す。

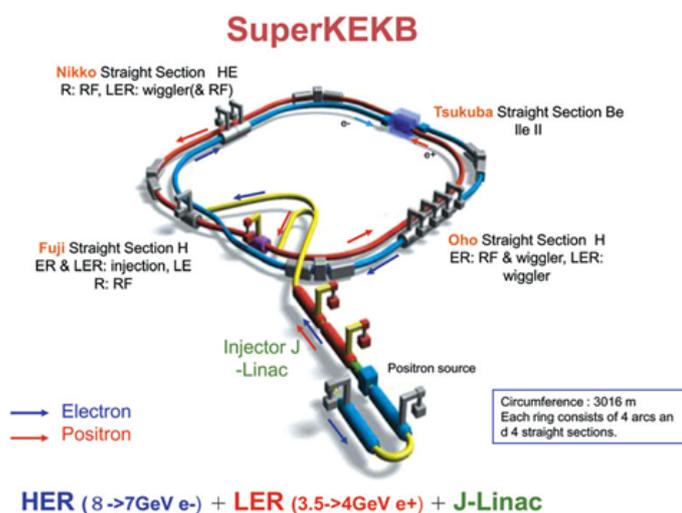


図 2.1 SuperKEKB 加速器

一般に、加速器の性能を表すパラメーターとして「衝突エネルギー」と「ルミノシティ」の2つがあげられる。ルミノシティ (Luminosity: L) とはビーム衝突点における単位面積、単位時間あたりの衝突頻度を表しており以下の式で定義される。

$$N = L \sigma \quad (2.1)$$

ここで $N[s^{-1}]$ は単位時間あたりの物理事象数、 $\sigma [cm^2]$ は反応断面積を表している。したがってルミノシティの次元は $[cm^2s^{-1}]$ と与えられる。

衝突型加速器実験は LHC に代表される高い衝突エネルギーによって新粒子を生成し性質を調べる「エネルギーフロンティア実験」と高ルミノシティ加速器を用いて稀崩壊事象を精密に測定し、新しい物理のフレーバー構造（素粒子の世代や種類）を明らかにする「ルミノシティフロンティア実験」の2つに分類される（図 2.2）。Belle 実験、Belle II 実験はルミノシティフロンティアに分類される。次に SuperKEKB 加速器への

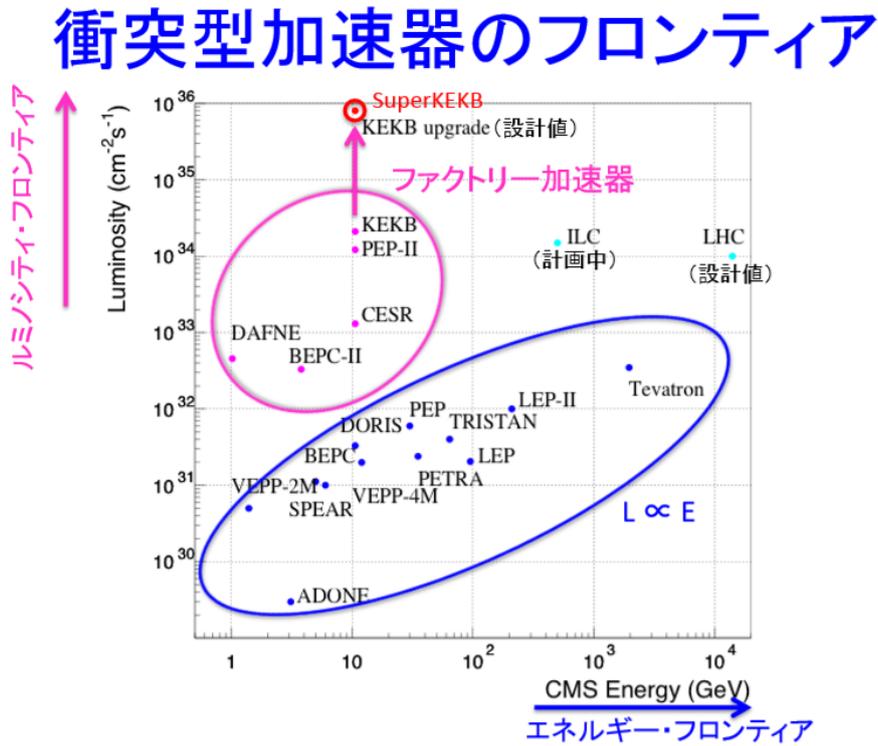


図 2.2 主な加速器実験の重心系エネルギー (CMS) におけるエネルギーとルミノシティによる分類。紫で囲まれたものはルミノシティフロンティア実験、青で囲まれたものはエネルギーフロンティア実験に該当する。

アップグレードについて述べる。ルミノシティ \mathcal{L} は電子・陽電子ビーム衝突に関する各パラメーターを用いて、以下のようにあらわされる。

$$\mathcal{L} = \frac{\gamma_{\pm}}{2e r_e} \left(1 + \frac{\sigma_y^*}{\sigma_x^*} \right) \frac{I_{\pm} \xi_{\pm y}}{\beta_y^*} \left(\frac{R_L}{R_y} \right) \quad (2.2)$$

ここで γ_{\pm} は Lorentz 因子、 e は素電荷量、 r_e は古典電子半径を表しており、 $\frac{\sigma_y^*}{\sigma_x^*}$ は電子・陽電子ビーム衝突点での水平方向 x 、垂直方向 y のビームサイズ比である。 I_{\pm} はビーム電流、 $\xi_{\pm y}$ は衝突点においてビーム同士が互いに及ぼし合う力の大きさを示しており、Beam-beam parameter と呼ばれている。 β_y^* は衝突点でのビームサイズを決める絞り込みの大きさに対応する量であり、 $\frac{R_L}{R_y}$ はビームを絞りすぎると衝突点前後でのビームが広がる現象（砂時計効果）や交差角衝突に対する補正係数である。また、*は衝突点での値ということの意味し、添え字の \pm は電子・陽電子の積であることを示している。式 (2.2) よりルミノシティ \mathcal{L} を上げるためにはビーム電流 I_{\pm} を大きくするか、 β_y^* を小さくすればよい。KEKB から SuperKEKB への改良ではビーム電流 I_{\pm} を約 2 倍、ビームの衝突点における焦点深度 β_y^* を 1/20 に絞ることにより約 40 倍のルミノシティを目標としている。

また、式 2.1 より、ルミノシティを向上させるためにはビーム電流 $I_{e\pm}$ を大きくするか、ビームサイズ β_y^* を小さくすればよい。SuperKEKB は $I_{e\pm}$ を 2 倍に、 β_y^* を 1/20 にする。ビームサイズを小さくするために採用されたのが「Nano-Beam 方式」である（図 2.3）。通常ビームサイズを絞る場合は砂時計効果による制限によってビームが重なる長さを程度までしか絞ることができない。しかしこの手法ではビームの交差角を大きくすることでパンチ長を短くすることでその問題を解決している。一方でビームサイズを小さく絞ることでビーム中で起こる Touchek 効果という（陽）電子同士の衝突・散乱の頻度が増大することが予想される。特に陽電子がこの効果を受けやすいため、陽電子のビームエネルギーを 4.0GeV/c へ増強することで低減を図っている。衝突エネルギーを Υ (4S) の生成エネルギーに調節するため、電子のビームエネルギーを 7.0GeV/c へ変更する。加速器の主なパラメーターを表 2.1 へまとめる。

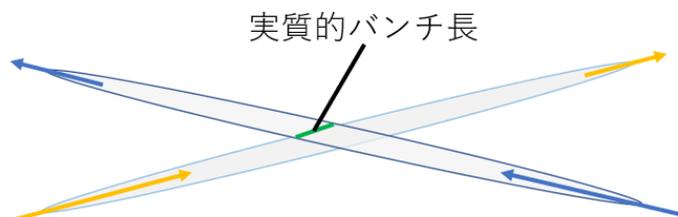


図 2.3 Nano-Beam 方式の概念図

表 2.1 SuperKEKB の加速器と KEBB 加速器の主なパラメーター

	KEKB	Super KEKB
エネルギー (GeV) (LER/HER)	3.5/8.0	4.0/7.0
ξ_y	0.129/0.090	0.090/0.088
β_y^* [mm]	5.9/5.9	0.27/0.41
I[A]	1.64/1.19	3.6/2.62

2.2 Belle II 測定器

Belle II 検出器は、内側から PXD、SVD、DCD、TOP、Aerogel RICH、ECL、KLM からなる複合検出器である。このうち PXD、TOP、Aerogel RICH は Belle II 実験より採用された新型の検出器になっている。Belle II 測定器の概念図を図 2.4 に示す。

Belle II 測定器は、ビーム軸の同心円に沿った円筒状の領域にあたる”Barrel 部”、その Barrel 部円筒の底面に対応する領域にあたる”Endcap 部”の 2 つに分類することができる。SuperKEKB は非対称エネルギー衝突であるため、衝突後の重心系は電子方向へ Lorentz boost される。この boost された陽電子の入射側の Endcap 部を”Forward-Endcap”、電子の入射側を”Backward-Endcap”と呼んでいる。粒子識別装置 Aerogel RICH は Forward-Endcap 側にのみ設置される。以下で各検出器の概要を簡単に説明する。

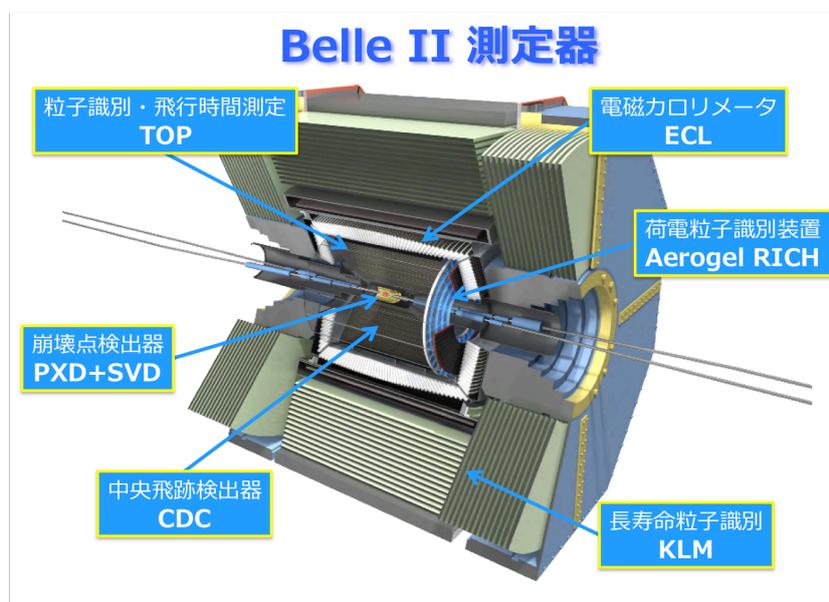


図 2.4 Belle II 検出器の概念図

2.2.1 PXD、SVD

PXD(Pixel Detector) と SVD(Silicon Vertex Detector) は Belle II 測定器の最内装に設置され、B 中間子の崩壊点を測定する検出器である。前者は内側 2 層のピクセル検出器、後者は外側 4 層のシリコンストリップ検出器の計 6 層構造となっている。B 中間子崩壊後にできる荷電粒子の秘跡を数 10μ の精度で検出し崩壊点を再構成する。Belle 実験では SVD のみが使用されていたが、内側に PXD を追加で設置することにより崩壊点検出の精度向上を図っている。崩壊点検出器の概念図を図 2.5、配置を図 2.6 に示す。

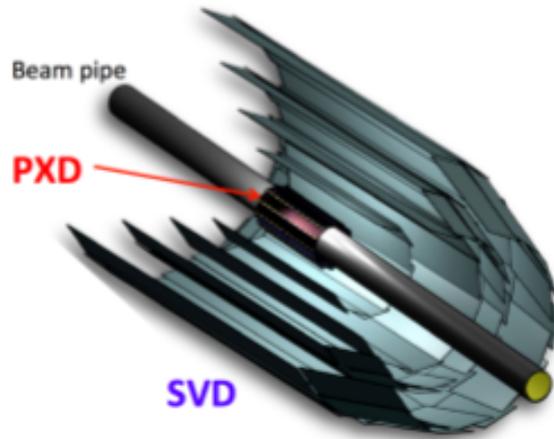


図 2.5 崩壊点検出器のイメージ図

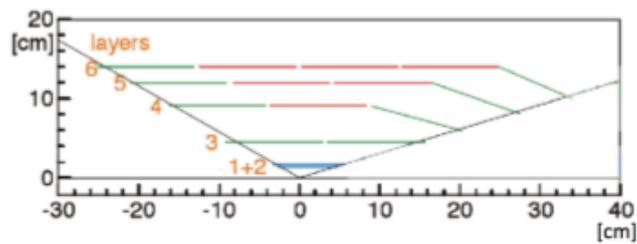


図 2.6 PXD、SVD の各層の配置図。検出可能範囲は $17^\circ < \theta < 150^\circ$ となっている。

2.2.2 CDC

中央飛跡検出器 CDC(Center Drift Chamber) は PXD、SVD のすぐ外側に設置されている。検出器内部に混合ガス (He 50%、 C_2H_6 50%) を充填させ、荷電粒子が中を通過する際に電離する電子を検出することで粒子の飛跡の再構成を行う。また、 $1\text{GeV}/c$ 以下の運動量領域での粒子識別も行う。Belle II 実験では測定器内部でビーム軸方向に沿って 1.5T の磁場をかけるので、荷電粒子は湾曲された軌道を描く。その際の曲率半径 ρ [m]、磁場 B [T] を用いて以下の式より運動量を求めることができる。

$$p[\text{GeV}/c] = 0.3 \rho [\text{m}]B[\text{T}] \quad (2.3)$$

CDC 内部には陰極と陽極の間に多数のワイヤーがはられており、その間に 2.3kV 程度の高電圧がかけられている。ガス中で発生した電子が電場中をドリフトすることで陽極側で電子信号として検出される。この電子が各ワイヤーまで移動する際のドリフト時間から荷電粒子が通過した位置 (飛跡) を求めている。さらに読み出された電荷量よりそこに落とされた損失エネルギー dE/dx を求めることができる。図 2.7 に粒子別の運動量

とエネルギー損失 dE/dx の関係を示す。図より $1\text{ GeV}/c$ 以下の運動量領域において電子、陽子、K 中間子、 π 中間子の識別が可能であることがわかる。CDC の要求性能は $\sim 1\text{ GeV}/c$ 程度である。また、Belle 実験、Belle II 実験での各ワイヤー配置を図 2.8 に示す。CDC はセルサイズを小さくすることで位置分解能の向上させ、さらに各セルの占有率を下げることでバックグラウンドの影響の低減がなされている。

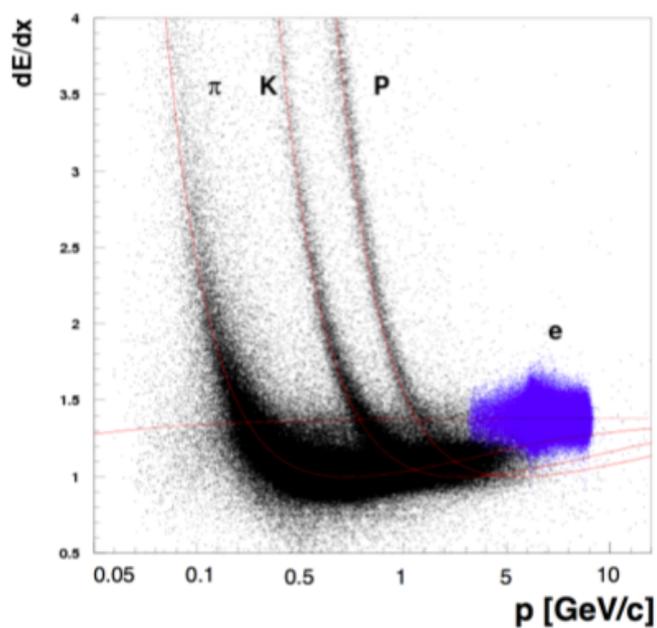


図 2.7 粒子別の運動量とエネルギー損失 dE/dx の関係。

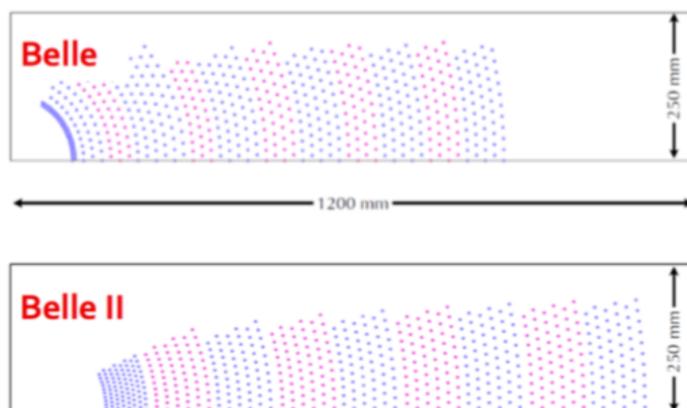


図 2.8 Belle 実験、Belle II 実験の CDC の断面図の比較。

2.2.3 TOP

TOP(Time of Propagation) は Belle II 検出器の Barrel 部で粒子識別を担う検出器である。TOP は DIRC(Detection of Internally Reflected Cherenkov light) というタイプのチェレンコフ検出器であり、荷電粒子が輻射体である石英ガラスのコーツバーを荷電粒子が通過した際に発生するチェレンコフ光を利用し粒子識別を行う。DIRC の検出原理と TOP モジュールの概要図をそれぞれ図 2.9、図 2.10 に示す。

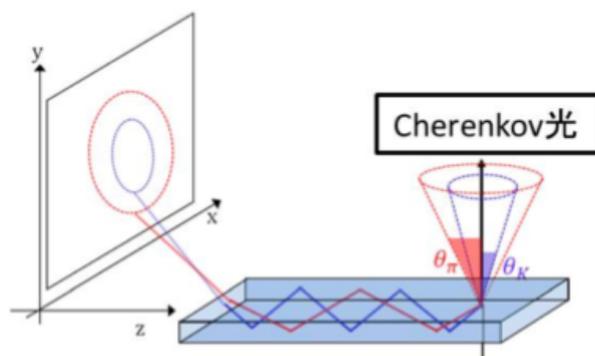


図 2.9 DIRC の検出原理

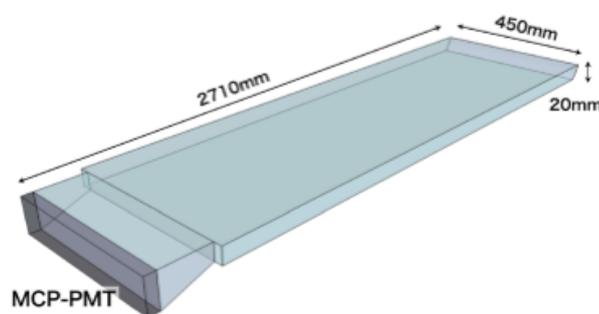


図 2.10 TOP モジュールの概要図

荷電粒子がコーツバーを通過した際に発生するチェレンコフ光はコーツ内を全反射して進み、端部で半円の形に投影される。チェレンコフ光の放射角 θ_c は荷電粒子によって異なるため、投影されたリングイメージの半径差から荷電 K/π 中間子を識別することができる。また、荷電 K/π 中間子はコーツ内での光路差が異なるため検出時間にも差が生じる。検出時間差を用いる TOF(Time-Of-Flight) も同時に行うことで粒子識別性能をより高めることが可能となる。これらの測定を可能にするために高い位置分解能、時間分解能を持つ光検出器として MCP-PMT(micro-Channel Plate PMT) が採用された(図 2.11)。MCP-PMT は 4×4 の 16ch アノードプレートの内蔵しており、1ch のサイズは $5.3\text{mm} \times 5.3\text{mm}$ である。増幅率は 10^6 、時間分解能は 40ps 程度である。TOP では $4\text{GeV}/c$ 以下の運動量で 97% の K/π 識別効率を目標にしている。



図 2.11 MCP-PMT

2.2.4 Aerogel RICH

ARICH(Aerogel Ring Imaging Cherenkov) は Belle II 検出器の Endcap 部で荷電 K/π 中間子の識別を担っている。荷電粒子が輻射体であるシリカエアロゲルを通過した際に発生するチェレンコフ光を光検出器 HAPD(Hybrid Avalanche Photo Detector) で二次元リングイメージとして検出する。その際に検出されたリングの半径差から荷電 K/π 中間子の識別を行う。運動量 3.5GeV で 4σ 以上の π/K 識別能力が要求されている。Aerogel RICH の詳細は 3 章で述べる。

2.2.5 ECL

ECL(Electromagnetic Calorimeter) は電子や γ 線のエネルギーを測定する検出器であり、トリガー情報の生成も行っている。装置内部のシンチレーターへ入射した電子や光子は電磁シャワーを起こしほぼすべてのエネルギーを失う。この際の電磁シャワーの光量を測定することで、電子の持っていたエネルギーを測定することができる。また、電子と陽電子の非弾性散乱である Bhabar 散乱の散乱頻度を測定することでルミノシティを見積もることもできる。ECL のシンチレーターに用いられているタリウムを添加した CsI(Tl) 結晶と概要図を図 2.12 へ示す。光検出器には PIN フォトダイオードが使用されている。Barrel 部に 6624 モジュール、Endcap 部に 960 モジュールが設置される。

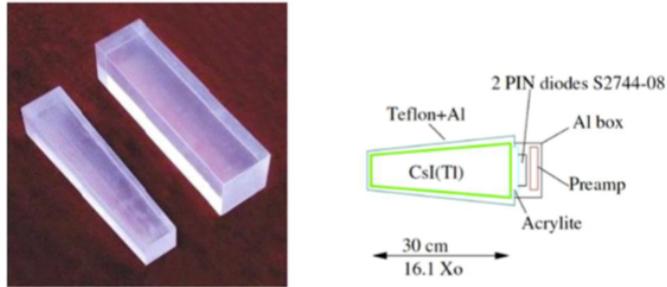


図 2.12 ECL モジュールの概要図。ECL 用のクリスタルと 1 ユニットの構成。

2.2.6 KLM

KLM(K-long/Muon detector) は Belle II 測定器の再外部に設置され、比較的寿命が長く貫通力の高い K_L^0 中間子と μ 粒子の識別を行う検出器である。RPC(Resistive Plate Chambers) と呼ばれるガスチェンバーと鉄のサンドイッチ構造をとっている。 k_L0 は鉄や ECL クリスタルとハドロン相互作用を起こすので、KLM を通過せずエネルギーを落として崩壊するが、透過力の高い μ 粒子はそのまま通過する。この違いや CDC などの飛跡検出器の情報を合わせることで K_L^0 中間子と μ 粒子の粒子識別が可能となる。断面図を図 2.13 へ示す。

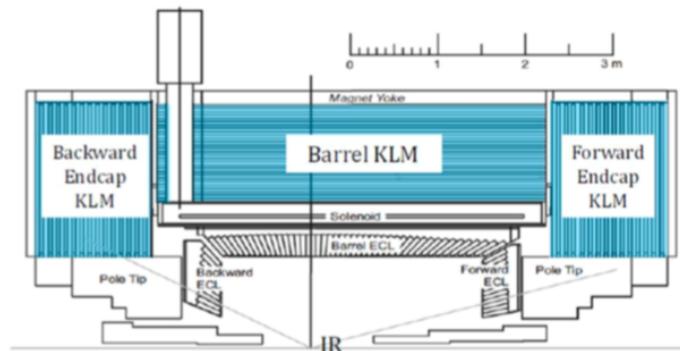


図 2.13 KLM の断面図

2.2.7 DAQ

Belle II 実験ではデータ収集 (data acquisition:DAQ)[5] システムを用いており、最大 30kHz でのイベントレートの読み出しをリアルタイムで行う。データの低減のために、物理解析に必要なデータを取捨選択するトリガーシステムが導入されている。各検出器からの信号はデジタル化され Belle2Link と呼ばれる光ファイバーによって COPPER(Common Platform of Pipe-line Electronics Readout) へとデータが送られるという共通の読み出しフレームワークを採用している。 Belle II DAQ システムの概要図を (図 2.14) へ示す。PXD を除く各検出器のデータは一段目の event ビルダーによってデータが統合され、その後 High Level Trigger(HLT) によって物理解析が必要であるかの取捨選択が行われる。PXD はデータ量が膨大なため、ONSEN(Online Select Node) と呼ばれるモジュールを用いて読み出しを行っている。HLT と ONSEN からのデータは二段目の event ビルダーで統合された後、ストレージに保存される。

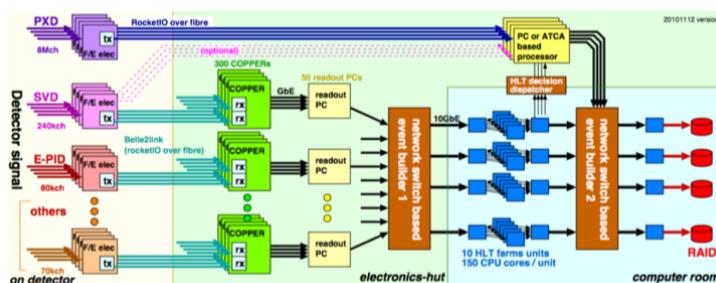


図 2.14 Belle II 実験のデータ収集システムの概要図

第 3 章

ARICH 検出器

3.1 ARICH 検出器に要求される性能

B 中間子の新物理探索のための稀崩壊事象を観測するためには $1.5\text{GeV}/c \sim 3.5\text{GeV}/c$ といった高運動量領域での荷電 K/π 中間子識別が求められる。ARICH は Belle II 検出器のビーム軸から垂直方向に $17^\circ < \theta < 35^\circ$ にあたる Endcap 部に設置されている。また、B 中間子崩壊では最大 $3.5\text{GeV}/c$ 程度の荷電粒子が飛来することが予想されているため、 $0.5 \sim 3.5\text{GeV}/c$ の運動量を持つ荷電 K/π 中間子に対し 4σ 以上の識別性能が要求される。

3.2 粒子識別原理

荷電粒子が媒質中を通過する際に媒質中の光速を超える場合がある。この際に媒質との相互作用により生じた電磁波は互いに干渉し、強め合うことで進行方向に衝撃波のように放出される。この現象を Cherenkov 放射といい、この時に発生する光を Cherenkov 光という。この Cherenkov 光は荷電粒子の進行方向に対し θ_c の角度で円錐状に放出される。この様子を図 3.1 へ示す。

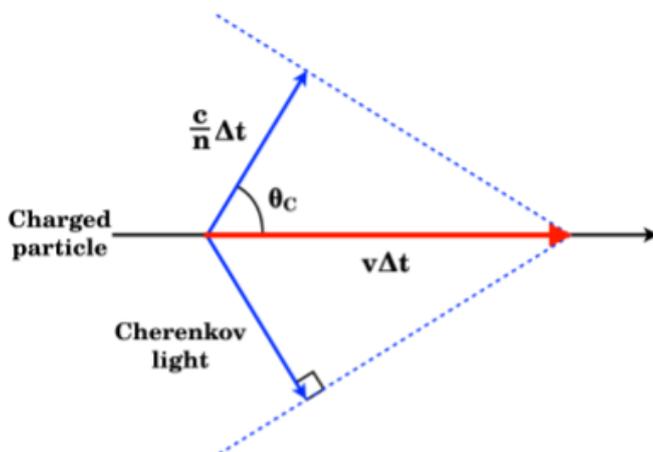


図 3.1 Cherekov 光発生原理の概要図

この Cherenkov 光による光子をリングイメージとして観測し、その放射角を調べることで粒子の種類を特定することができる。この方法を用いて粒子識別を行う検出器を RICH(Ring Imaging CHerenkov) 検出器という。ARICH 検出器では粒子の飛来方向前段に設置されている輻射体の後段に単光子検出可能な光検出器を配置し円錐状に放射された Cherenkov 光をリングイメージとして取得し、放射角を測定することで粒子識別を行う。放射角 θ_c と粒子の質量 m は以下の関係式が成り立つ。

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

ここで p は荷電粒子の運動量、 c は真空中の光速、 n は輻射体の屈折率である。運動量 p は CDC から得られ、屈折率 n はエアロゲル製作の際に調節された既定値である。よって放射角 θ_c を測定することで質量 m 、つまり粒子の種類を特定することが可能となる。Cherenkov 光発光点から光検出器までの距離を L 、リング半径を r とすると以下の式で θ_c を求めることができる。(式 3.2 へ示す)。

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

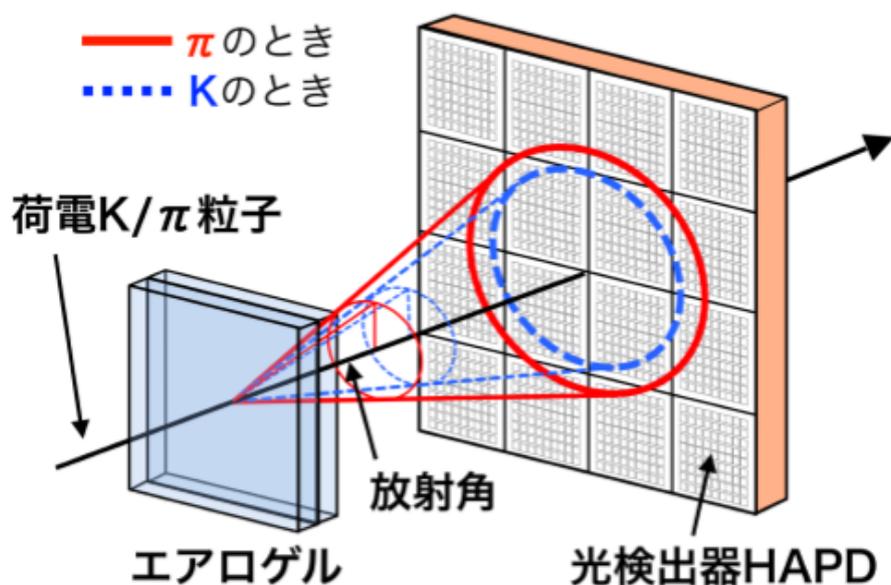


図 3.2 ARICH 検出器の粒子識別方法の概念図

以上が ARICH における識別原理である。

3.2.1 ARICH 検出器の構造と構成要素

ARICH 検出器の構造イメージを図 3.3、ARICH の設計図を図 3.4 へ示す。ARICH 検出器は中央部がビームラインを通り、Endcap 部へ設置されるため中心が開いたドーナツ型の形状をもつ検出器となっている。

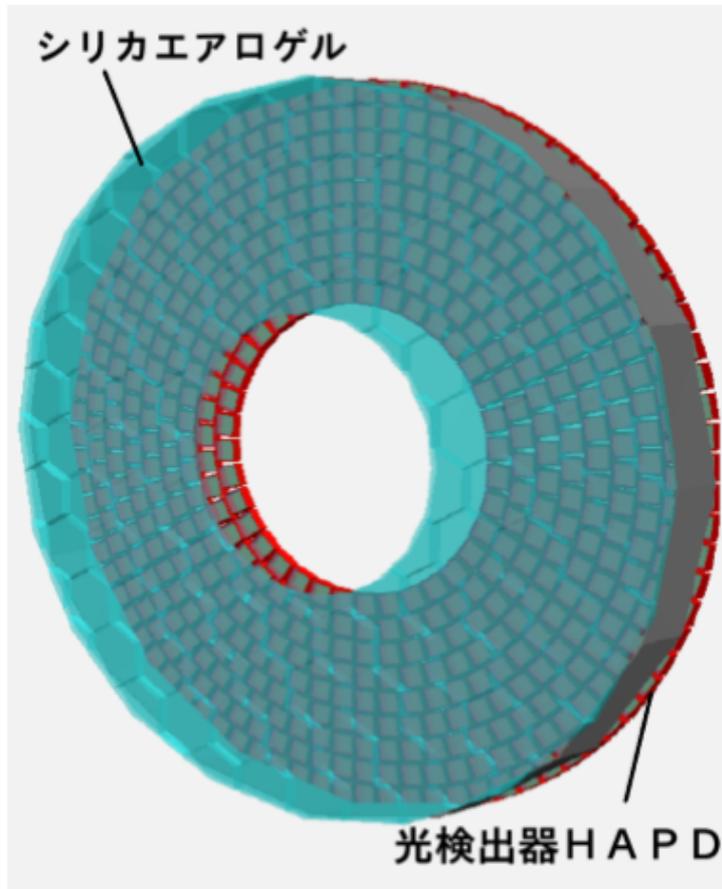


図 3.3 ARICH 検出器の構造図

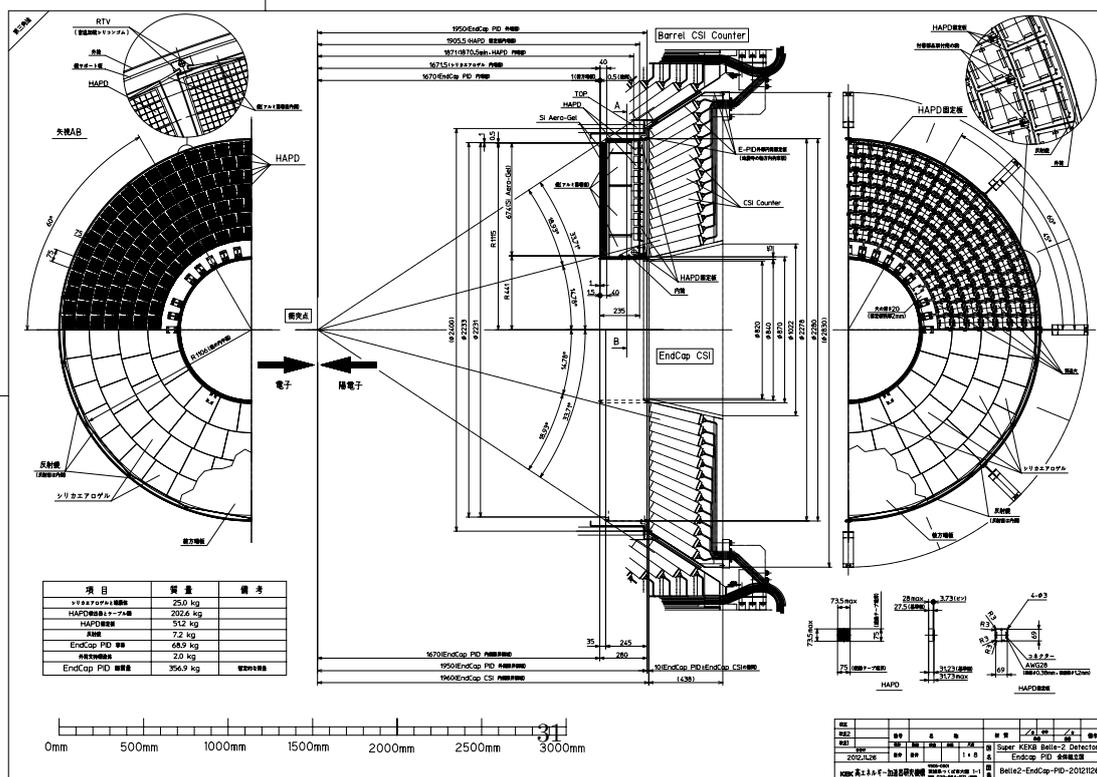


図 3.4 ARICH の設計図

輻射体

チェレンコフ光の輻射体にはシリアエアロゲルを採用した（図 3.5）。シリカエアロゲルは SiO_2 が三次元的に配列した多孔物質であり、体積の 98% が空気で占められている。内部構造の模式図を図 3.6 に示す。さらに粒子半径が数十 nm 程度と可視光の波長 (400nm~700nm) と比べ十分小さいので高い光透過性を持つ。固体でありながら低屈折、低密度、高透過長の特殊な構造をしている。また、シリカエアロゲルは作成時に屈折率を $n=1.007\sim 1.2$ の間で任意に調節することができる。

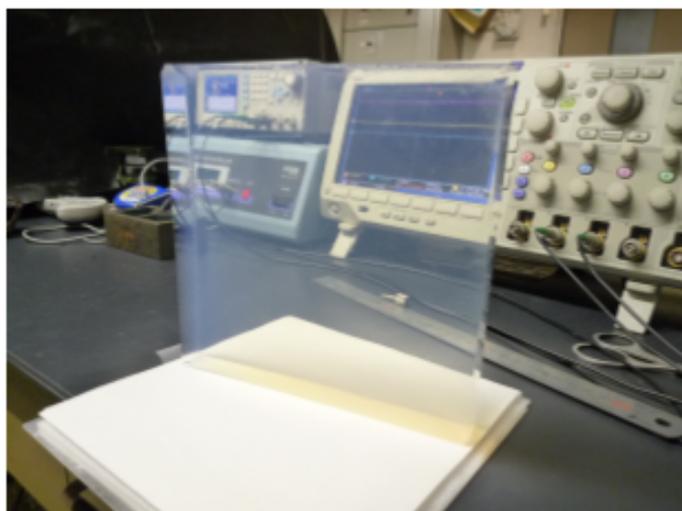


図 3.5 シリカエアロゲル。レイリー散乱のため表面が青くなっている。

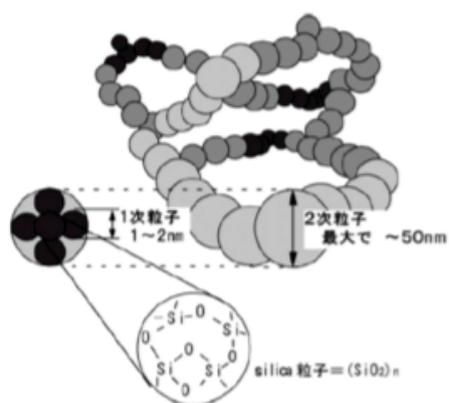


図 3.6 シリカエアロゲルの内部構造

また、角度分解能向上のため ARICH 検出器では屈折率の異なる 2 層のアロゲルを使用するデュアルレイヤー方式 (図 3.7) を採用した。1トラック (1 回の荷電粒子通過) あたりの角度分解能は以下の式で表される。

$$\sigma = \frac{\sigma_{signal}}{\sqrt{N_{p.e}}} \propto \frac{1}{\sqrt{d}} \quad (3.3)$$

σ_{single} は 1 光子当たりの角度分解能、 $\sqrt{N_{p.e}}$ は 1 トラックあたりに検出された光子数、 d はシリカエアロゲル (輻射体) の厚さである。輻射体を厚くすることで光子数を増やすことができるが、同時に式 (3.3) において 1 光子当たりの角度分解能が悪くなってしまう。そこで上流と下流で異なる屈折率 n_1, n_2 を持つ 2 つのシリカエアロゲルを重ねて設置することによりこの問題を解決した。屈折率 $n_1 < n_2$ (n_1 が上流、 n_2 が下流) とすることで、上流で発生したチェレンコフ光と下流で発生したチェレンコフ光を絞り角度分解能を向上することができる。ARICH では $n_1 = 1.045, n_2 = 1.055$ のシリカエアロゲルを使用する。

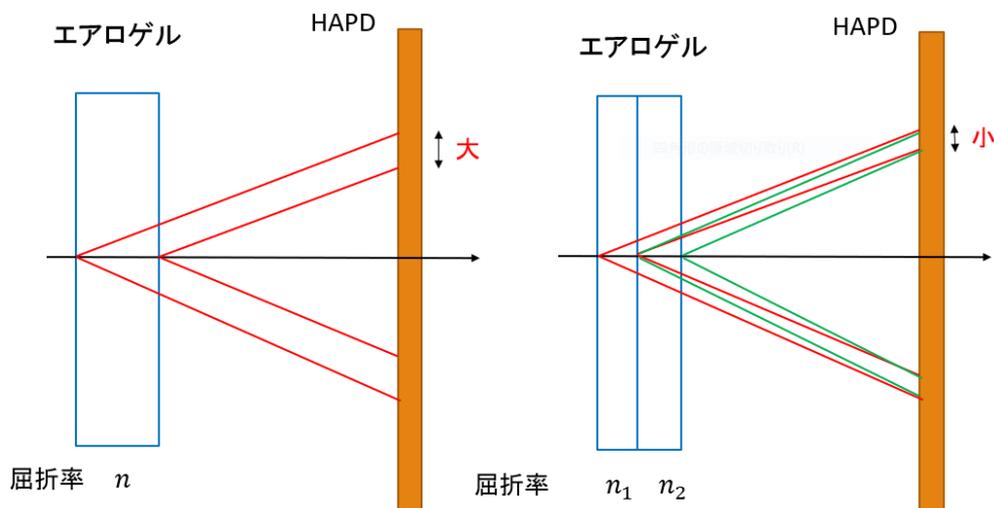


図 3.7 デュアルレイヤー方式の概念図

3.2.2 光検出器

光検出器に要求される性能としては、単光子の検出が可能であること、放射角の差から粒子識別を行うために 5mm 以下の位置分解能があること、さらに Belle II 検出器内の 1.5T という高磁場中で動作可能であることがあげられる。これらの要求を満たす光検出器として HAPD (Hybrid Avalanche Photo Detector) を採用した。HAPD の外観と寸法を図 3.8 へ示す。

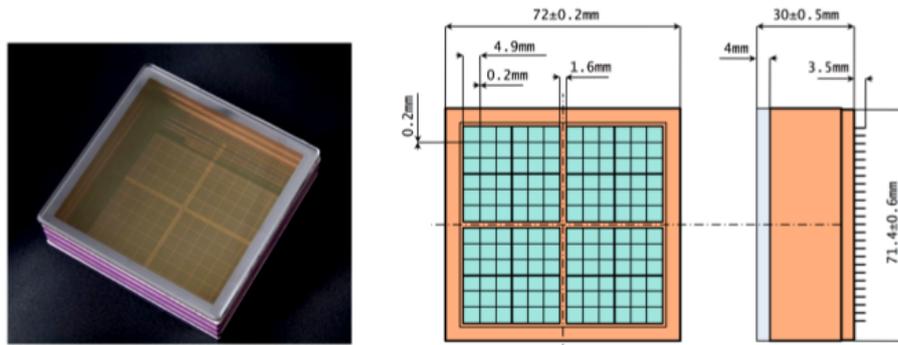


図 3.8 左図：HAPD の外観。右図：HAPD の寸法

HAPD の仕様と動作原理について説明する。HAPD の仕様を表 3.1 示す。

表 3.1 HAPD の仕様

外寸	$73 \times 73 \times 28mm^3$
チャンネル数	$12 \times 12=144ch$
有効面積	65%
量子効率	~28%(波長:400nm)
S/N 比	~15
ピクセルサイズ	$4.9mm \times 4.9mm^2$
打ち込み増幅率	~1500
avalanche 増幅	~40
総増幅率	~60000

次に HAPD の動作原理を図 3.9 へ示す。HAPD は高電圧が印加可能な真空管内にピクセル化された APD(Avalanche photo diode) が内臓されている。これは Avalanche (雪崩) 増幅を利用した受光ダイオードの一種である。(図 3.10) また、入射窓の内側にはアルカリ金属を蒸着させることで光電陰極としている。荷電粒子が輻射体を通過した際に発生するチェレンコフ光による光子は、光電面で光電子へ変換され、光電面と APD 間にかけられた加速用電圧 (HV:~7kV) により加速され APD へ入射する。光電子はエネルギーを落として停止し、1500 程度の電子・正孔対を生成する。これらの電子が APD に印加されている逆バイアス電圧 (Bias:~350V) によりアバランシェ増幅を起こし約 40 倍に増幅される。この電場による加速と APD における Avalanche 増幅の二段階の電子増幅を行うことで最終的に約 60000 倍という高い増幅率を得られる。

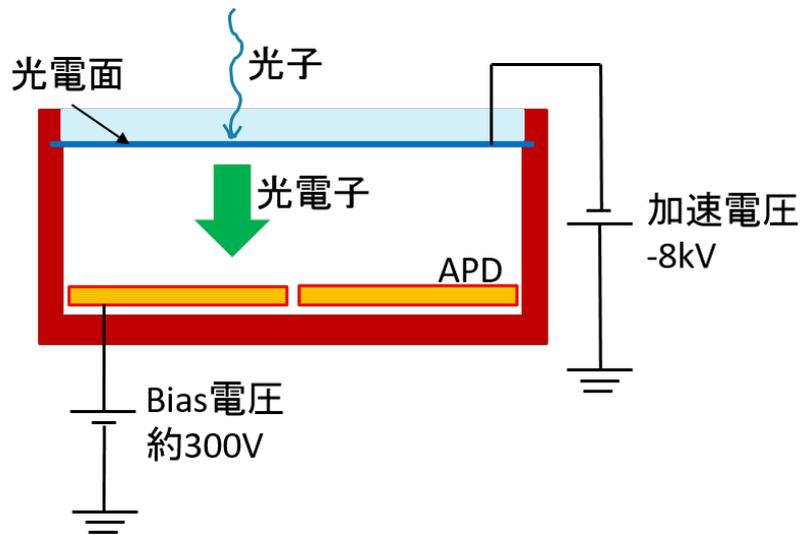


図 3.9 HAPD の動作原理

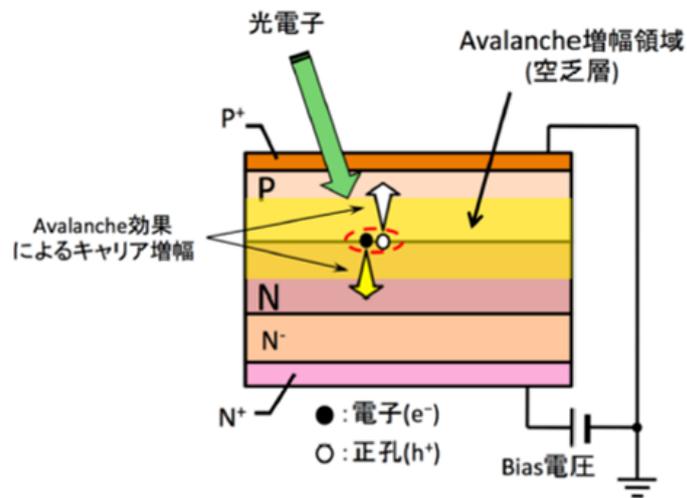


図 3.10 APD の動作原理

3.2.3 ARICH 検出器のミラー

ARICH 検出器にはミラー（反射鏡）が設置されている。これは ARICH 外層壁まで到達した Cherenkov 光を反射させることによって光子数を減少させないためである。

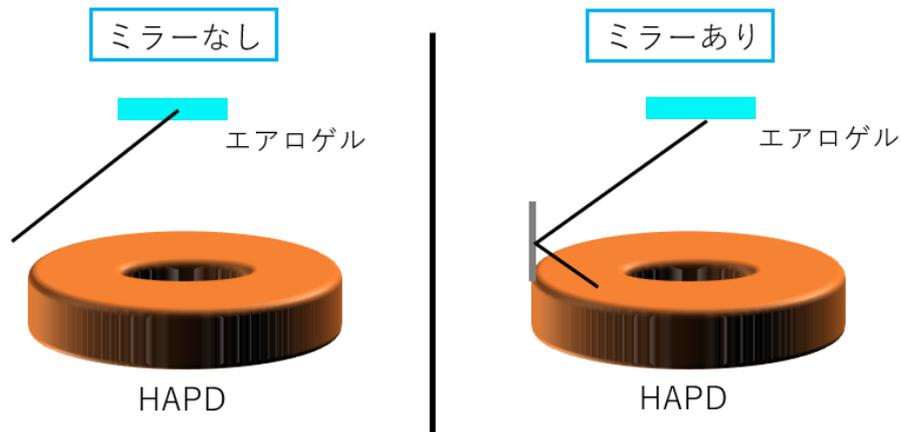


図 3.11 ミラーを設置すると外層壁へ到達した Cherenkov 光を反射させることにより光子数を維持することができる。

ミラーの概要

ARICH 検出器の外壁を覆うように全 18 枚のミラーが設置されている。(図 3.12) 基板は float glass（普通のガラス）が用いられており、その表面を薄いクォーツの層で覆われたアルミニウムでコーティングしている。その他の仕様を表 3.2 へ示す。

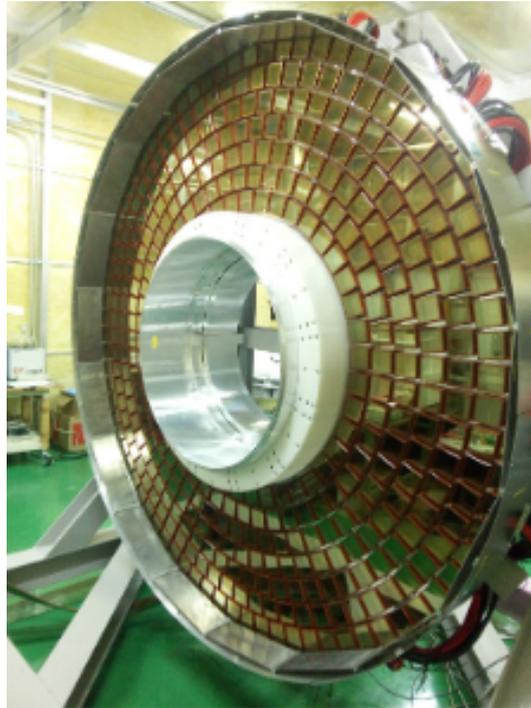


図 3.12 ARICH のミラー。ARICH 検出器の端を覆うように取り付けられている。

表 3.2 ミラーの仕様

大きさ	131mm × 383mm
厚さ	2mm
密度	2.49 g/cm ³
中性子耐性	10 ¹² neutron/cm ²

また、波長と反射率の関係について図 3.13 に示す。Cherenkov 光の放射および検出で重要となる 250nm～600nm の範囲で 85% 以上の反射率を有している。低波長領域では反射率測定の際の統計量が少ないため一部 100% を超えてしまっているところがある。

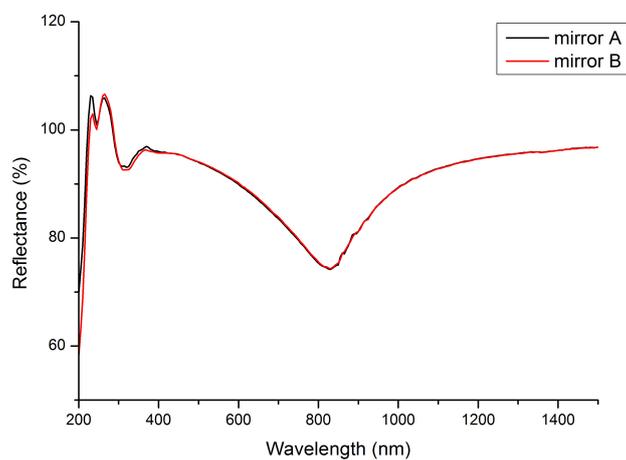


図 3.13 波長と反射率の関係

第 4 章

ミラーにヒットした粒子の粒子識別の評価

この章ではミラーがある場合とない場合にどの程度粒子識別能力に差があるのかを確認し、さらにミラー設置精度によりどれほど粒子識別能力に影響がでるのかを検証する。

4.1 ARICH 検出器の粒子識別方法

ARICH 検出器では各トラックに対して候補となる粒子 (π 、K、 μ 、e、p、d) の Likelihood を計算している。各候補粒子の期待されるチェレンコフ角付近の領域を選択しその内部にヒットした検出光子の数を期待される検出光子数の比較を行う。さらに選択領域内でヒットがあったピクセルのセット確率の総和を計算し、先ほどの選択領域内の検出光子数との和をとることで候補粒子ごとの likelihood の計算を行っている。log Likelihood の式を式 4.1 へ示す。一項目が検出光子数、2 項目が Cherenkov 角に対応している。

$$\ln \mathcal{L} = -N + \sum [n_i + \ln(1 - e^{-n_i})] \quad (4.1)$$

粒子識別の評価として PID (Particle Identification) の評価を行う。本研究では Belle II PID (ARICH 検出器 + TOP 検出器 + dE/dx) の粒子識別を用いる。識別効率 ($K(\pi)$ を $K(\pi)$ と識別した割合)、誤識別率 ($K(\pi)$ を π (K) と識別した割合) の定義をそれぞれ式 4.2、式 4.3 へ示す。

$$\text{識別効率} = \frac{K(\pi) \text{ と識別された数}}{\text{全 } K(\pi) \text{ の数}} \quad (4.2)$$

$$\text{誤識別効率} = \frac{K(\pi) \text{ 中間子と誤識別された粒子数}}{K(\pi) \text{ 中間子を除くすべての粒子数}} \quad (4.3)$$

4.2 シミュレーション

本章では $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B}$ および B 中間子崩壊を EvtGen イベントジェネレータを用いて生成し、 B 中間子崩壊後の荷電粒子 (π 、K、 μ 、e、p、d) および光子等中性粒子の検出器との相互作用を Geant 4 モンテカルロシミュレーションを用いて行った。シミュレーションにより ARICH 検出器を通過する荷電粒子を選び粒子識別の評価に用いた。ミラー反射した粒子を多く得るためトラックの入射角を $\cos\theta$ とし、 $0.78 < \cos\theta < 0.88$ の範囲のものを使用している。

4.2.1 設置精度によるミラー識別効率の評価

理想的な位置にある場合の K 中間子の識別効率・誤識別率の結果を以下へ示す。

図 4.1 の左上は-321 のピークが K^- の数、321 が K^+ の数を示す。図 4.1 のその他の図は K/π 識別の Likelihood Ratio であり、1 に近いと Kらしいことを示す。

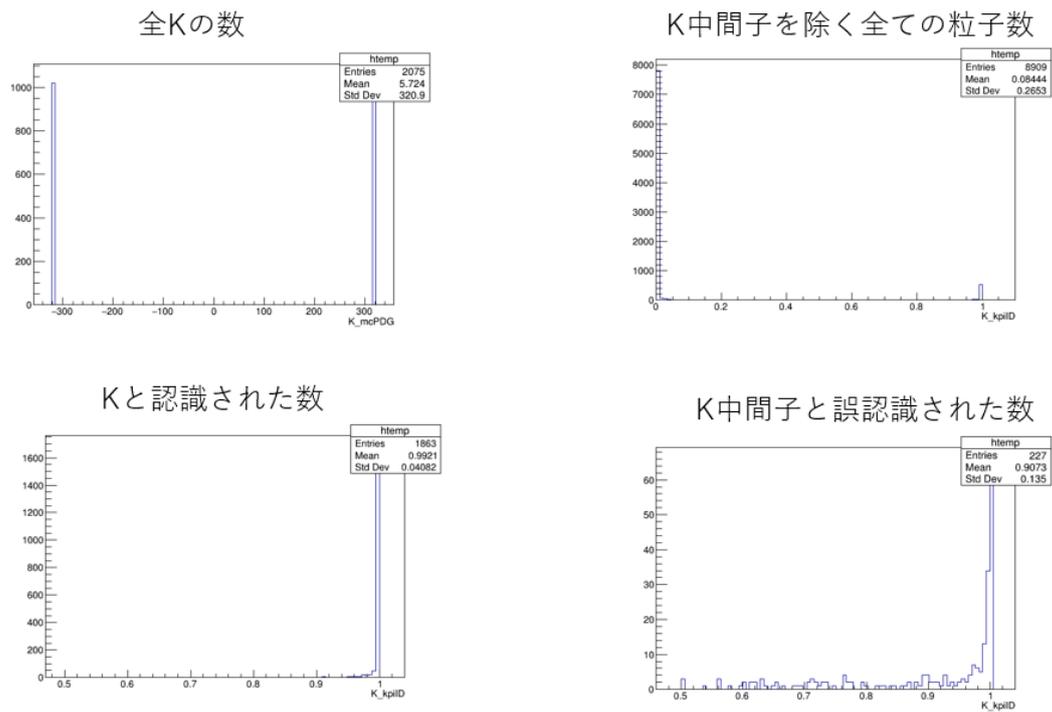


図 4.1 理想的な位置にある場合の K 中間子についてのシミュレーション結果

表 4.1 識別効率と誤識別率

識別効率	$(89.78 \pm 0.67)\%$
誤識別率	$(2.53 \pm 0.27)\%$

同様に理想的な位置にある場合の π 中間子の識別効率・誤識別率の結果を以下へ示す。

図 4.2 の左上は-211 のピークが π^- の数、211 が π^+ の数を示す。図 4.2 のその他の図は K/ π 識別の Likelihood Ratio であり、1 に近いと Kらしいことを示す。

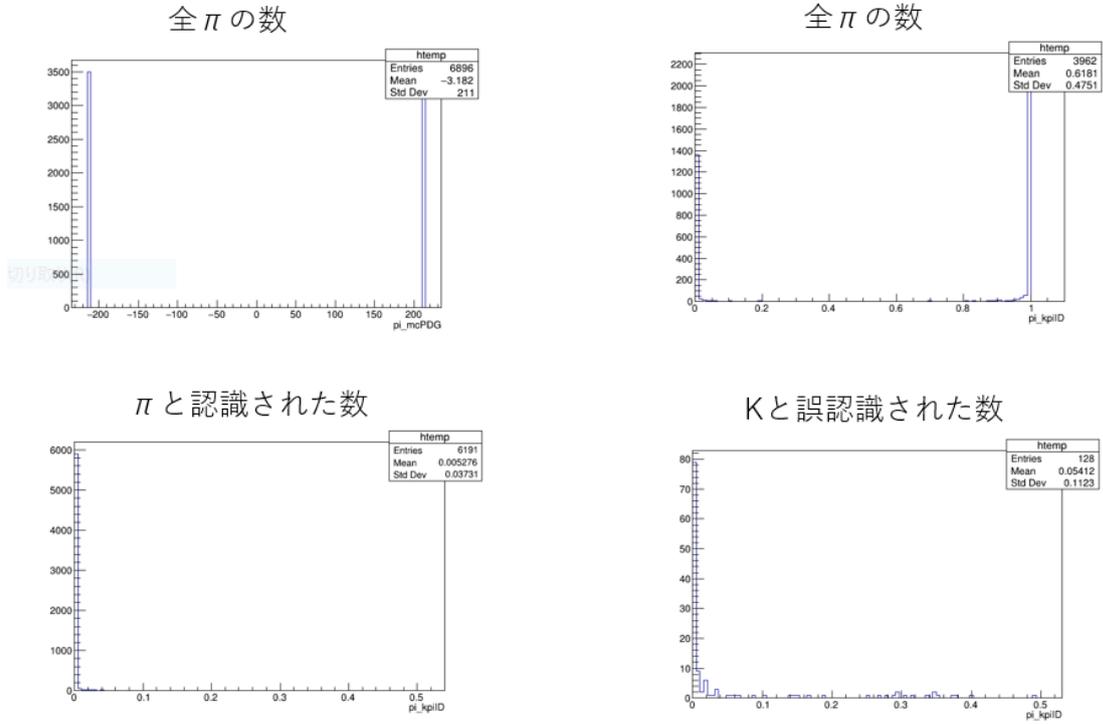


図 4.2 理想的な位置にある場合の π 中間子についてのシミュレーション結果

表 4.2 識別効率と誤識別率

識別効率	$(89.78 \pm 0.36)\%$
誤識別率	$(3.23 \pm 0.28)\%$

次に R 方向へ 5mm ずらした場合の K 中間子の識別効率・誤識別率の結果を以下へ示す。
 図 4.3 の左上は-321 のピークが K^- の数、321 が K^+ の数を示す。図 4.3 のその他の図は K/ π 識別の Likelihood Ratio であり、1 に近いと K らしいことを示す。

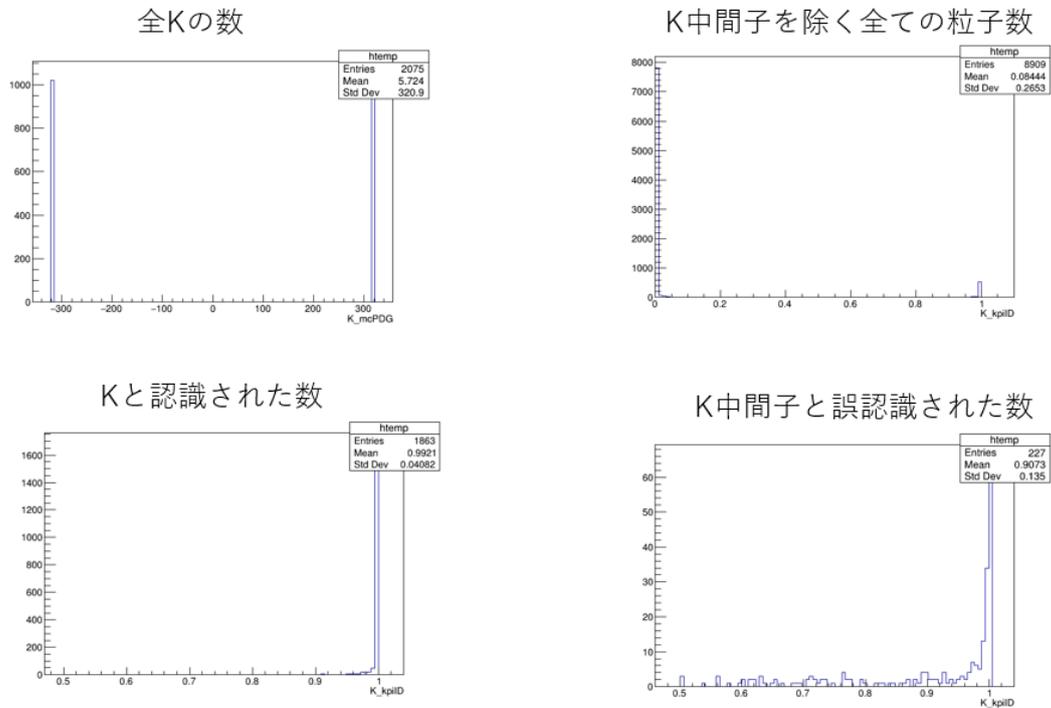


図 4.3 R 方向へ 5mm ずらした場合の K 中間子についてのシミュレーション結果

表 4.3 識別効率と誤識別率

識別効率	$(89.96 \pm 0.66)\%$
誤識別率	$(3.03 \pm 0.18)\%$

同様に R 方向へ 5mm ずらした場合の π 中間子の識別効率・誤識別率の結果を以下へ示す。
 図 4.4 の左上は-211 のピークが π^- の数、211 が π^+ の数を示す。図 4.4 のその他の図は K/ π 識別の Likelihood Ratio であり、1 に近いと K らしいことを示す。

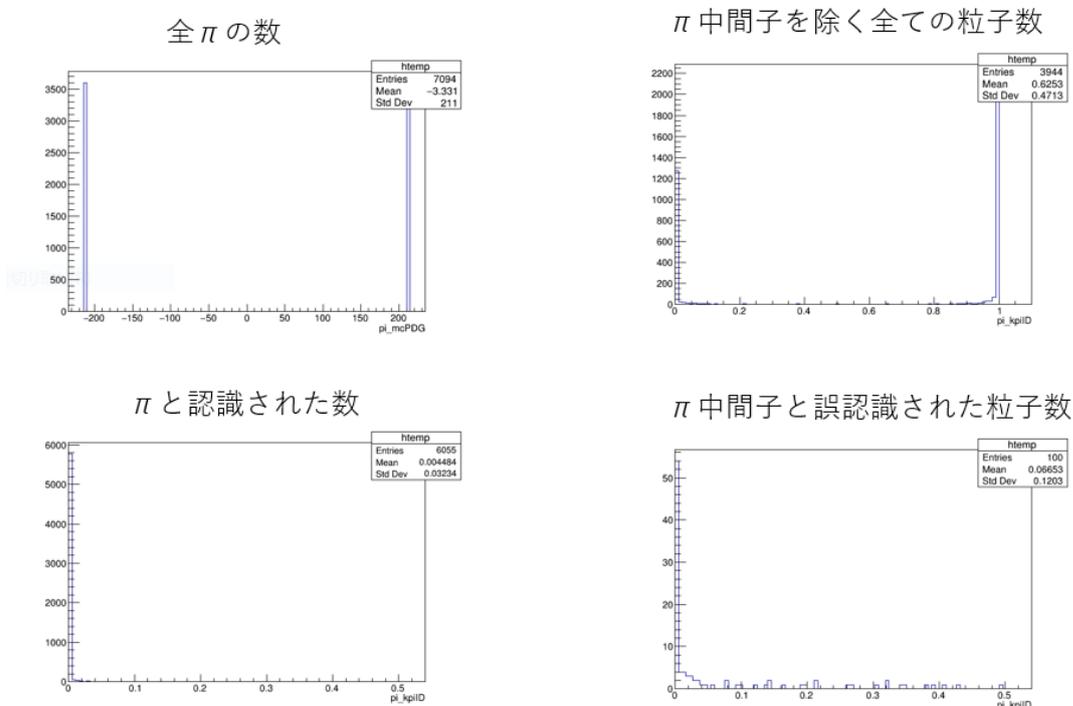


図 4.4 R 方向へ 5mm ずらした場合の π 中間子についてのシミュレーション結果

表 4.4 識別効率と誤識別率

識別効率	$(85.35 \pm 0.42)\%$
誤識別率	$(2.54 \pm 0.25)\%$

シミュレーションの結果から設置精度による K 中間子の識別効率は誤差の範囲内に収まり影響がないことがわかった。 π 中間子の識別性能においては設置精度により効率が落ちてしまうためミラーのアライメントが必要であるということがわかった。

4.2.2 ミラーがない場合の識別効率の評価

ミラーがない（反射率=0）場合のシミュレーションについても行った。その際の K 中間子の識別効率・誤識別率の結果を以下へ示す。

図 4.5 の左上は-321 のピークが K^- の数、321 が K^+ の数を示す。図 4.5 のその他の図は K/ π 識別の Likelihood Ratio であり、1 に近いと K らしいことを示す。

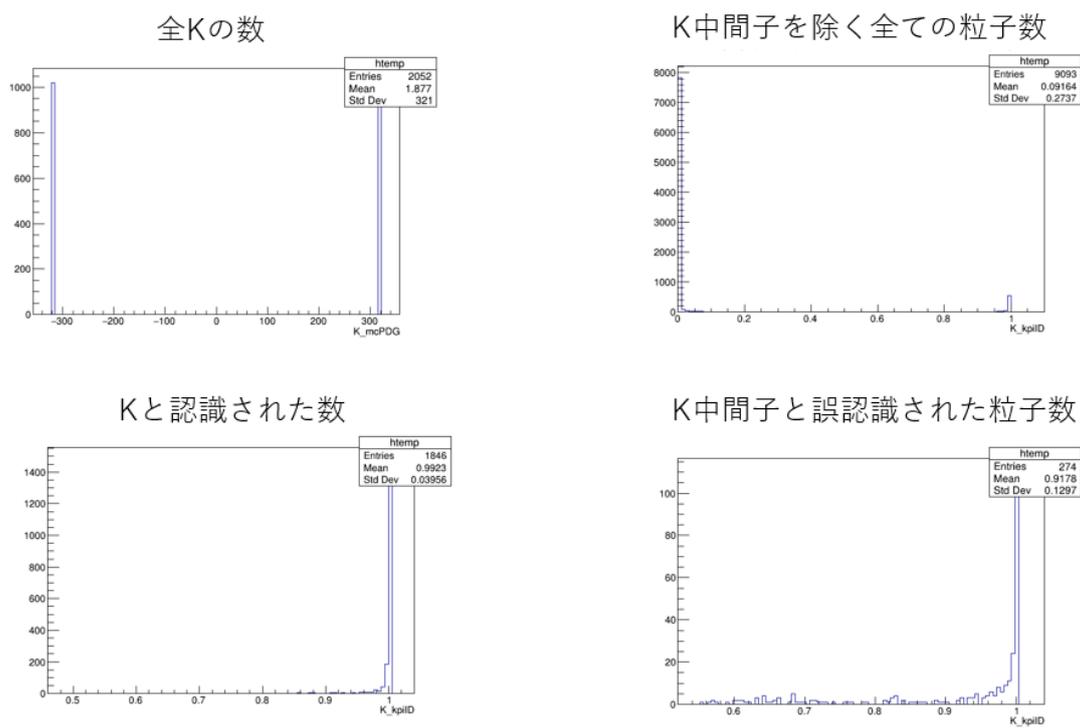


図 4.5 反射率=0 の場合の K 中間子についてのシミュレーション結果

表 4.5 識別効率と誤識別率

識別効率	$(89.78 \pm 0.68)\%$
誤識別率	$(7.36 \pm 0.27)\%$

ミラーがない（反射率=0）場合の π 中間子の識別効率・誤識別率の結果を以下へ示す。

図 4.6 の左上は-211 のピークが π^- の数、+211 が π^+ の数を示す。図 4.6 のその他の図は K/ π 識別の Likelihood Ratio であり、1 に近いと K らしいことを示す。

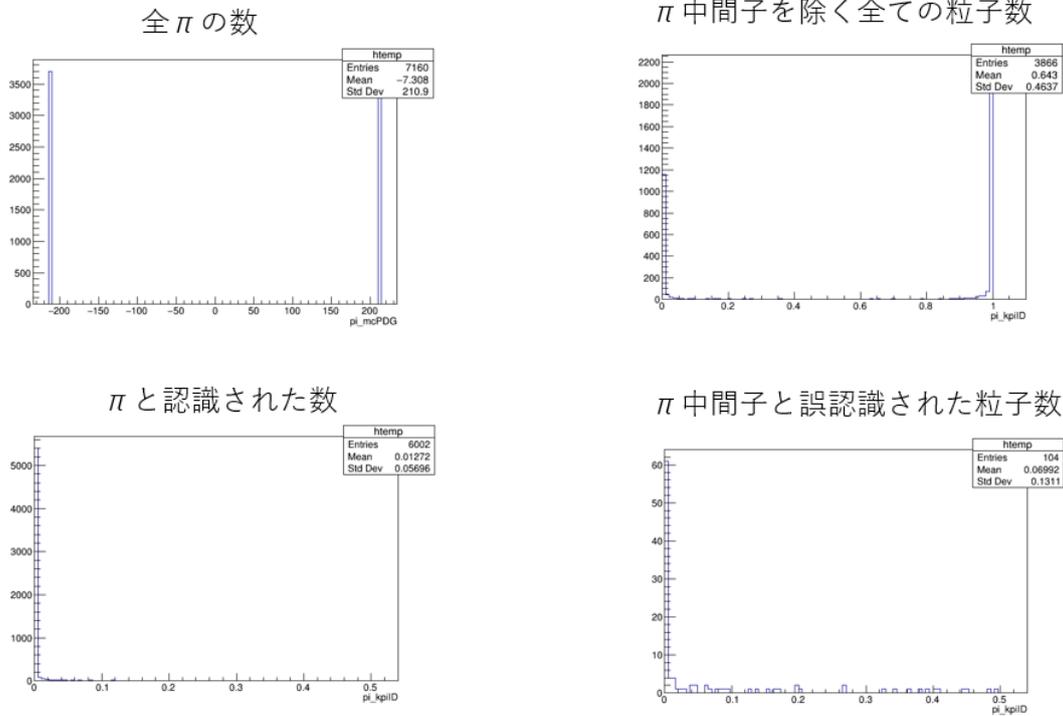


図 4.6 R 方向へ 5mm ずらした場合の π 中間子についてのシミュレーション結果

表 4.6 識別効率と誤識別率

識別効率	$(83.83 \pm 0.44)\%$
誤識別率	$(2.68 \pm 0.26)\%$

シミュレーションの結果からミラーの有無による K 中間子の識別効率は誤差の範囲内に収まり影響がないことがわかった。 π 中間子の識別性能においてはミラーがない場合、設置されている場合より識別効率が約 6% 落ちてしまうことがわかった。そのためミラーは ARICH 検出器の粒子識別に有効であるということがわかった。

第 5 章

ミラーのアライメント手法の開発

ARICH が Belle II 検出器へインストールされる際にミラーがずれてしまう可能性がある。この際に Cherenkov 角分布がどのように変化するかをシミュレーションで確認を行い、影響がある場合はその結果を ARICH のソフトウェアへ組み込むことを目的としている。

5.1 シミュレーションのセットアップ

ミラーのアライメントを行う際に行ったシミュレーションについて表 5.1 へ示す。

表 5.1 シミュレーションのパラメーター

入射角	25°~35°
入射粒子	e^\pm
event 数	200000
運動量	6.7GeV/c

4 月から行われたビーム衝突では $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ 事象はトリガー環境の問題で得られず、ARICH へ飛来した運動量 5GeV/c 以上の高運動量の荷電粒子はほぼ Bhabha 散乱による e^\pm であったため、Bhabha 散乱のモンテカルロシミュレーションを行った。ミラーにヒットする粒子の割合を増やすため e^\pm を入射角 25°~35° で ARICH へ入射した。光子は、ミラーに当たったと仮定されて再構成されたものを使用する。

図 5.1、図 5.2 にシミュレーションで用いる変数の定義を示す。ミラーのヒット位置について ARICH の円周方向を ϕ 、HAPD へ垂直方向を z 、さらに HAPD に対する光子の入射角を θ とし、 $\cos \theta$ とする。また、 ϕ と z のヒット位置は光子の HAPD でのヒット点および CDC から外挿した荷電粒子の飛跡のエアロゲル上での位置から再構成されたものを用いている。

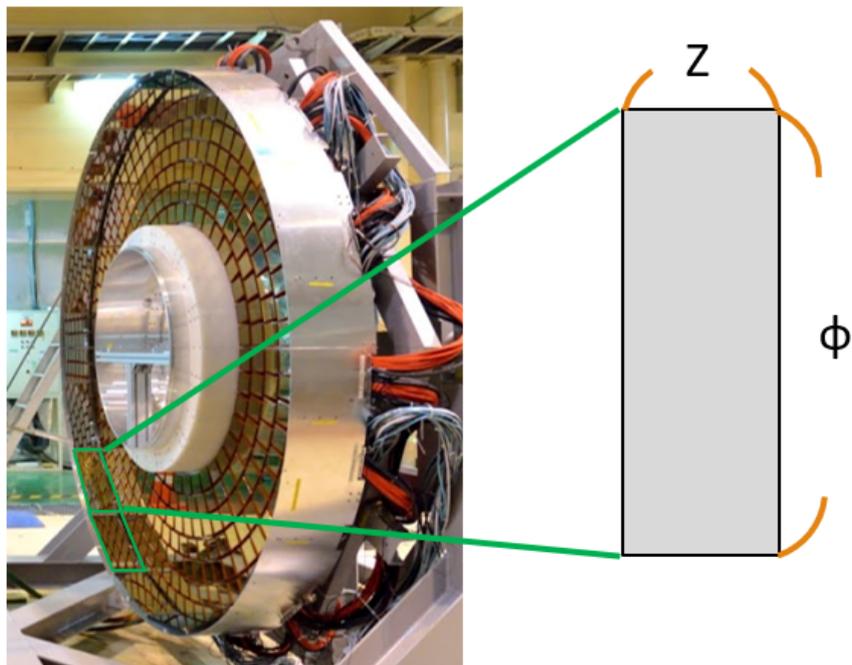


図 5.1 アライメントに用いるパラメーターの定義

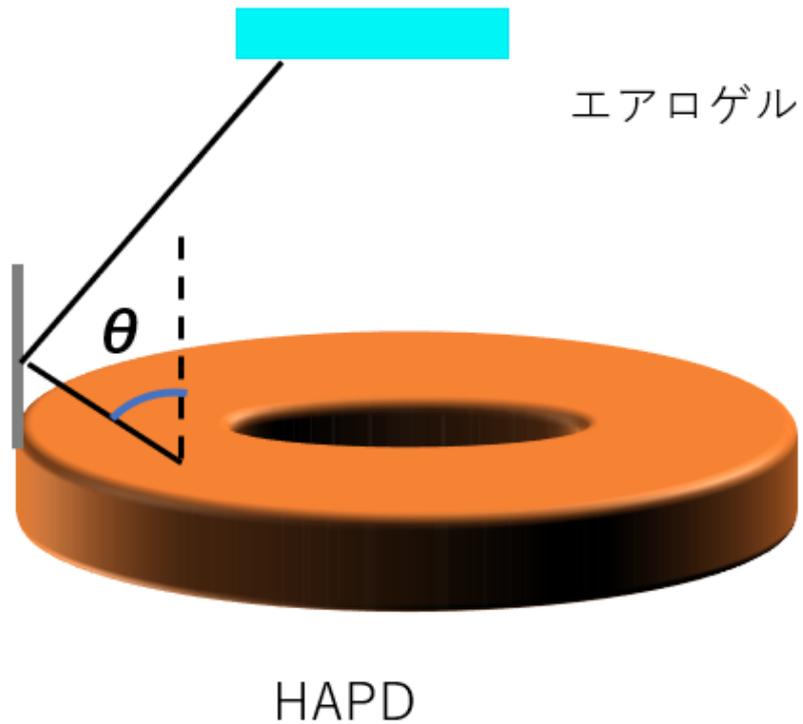


図 5.2 アライメントに用いるパラメーターの定義

以上の条件で R 方向、 ϕ 方向の回転、 θ 方向の回転のシミュレーションを行った。ミラーの位置のずれを確認する変数としては Cherenkov 角を θ_c 、エアロゲルの屈折率を n として $n \cos \theta_c$ を用いる。この変数は粒子の速度の逆数に比例した量になっておりこの値 ($\beta = v/c = 1$ のときは $n \cos \theta_c = 1$) が期待される位置からずれると粒子識別に悪影響を及ぼす。

5.1.1 正しい位置にミラーがある場合の Cherenkov 角分布

始めに正しい位置にミラーがある場合の Cherenkov 角分布について図 5.3 を示す。ピーク部を正規分布でフィットしたときの μ の値は (0.99993 ± 0.00003) 、 σ は $(0.4085 \pm 0.003) \times 10^{-2}$ となっている。ARICH 検出器では Cherenkov 角を再構成する際に、光子が直接 HAPD へ入射した場合とミラーにヒットした場合と 1 つの光子に対し複数再構成されている。本研究ではミラーにヒットしたと仮定され再構成された光子のみを用いている。

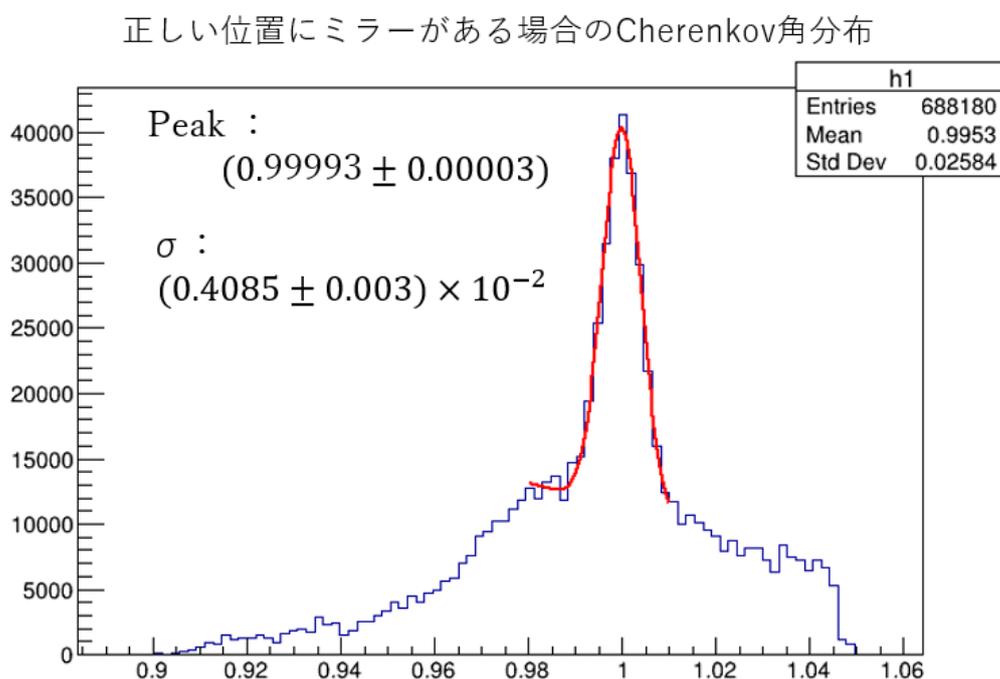


図 5.3 ミラーが正しい位置にある場合の Cherenkov 角分布

5.1.2 R 方向へのミラーの位置ずれのシミュレーション

ミラーが R 方向へずれた場合を考える。+R (外側) へずれた時の概念図を 5.4 を示す。+R 方向へずれた際、光子のヒット位置は正しい位置にある場合より外側になる。そのためチェレンコフ角は本来より小さく再構成されると予測される。同様にして -R (内側) へ移動した際は光子のヒット位置が本来の位置より内側になるため Cherenkov 角は大きく再構成されると予測される。

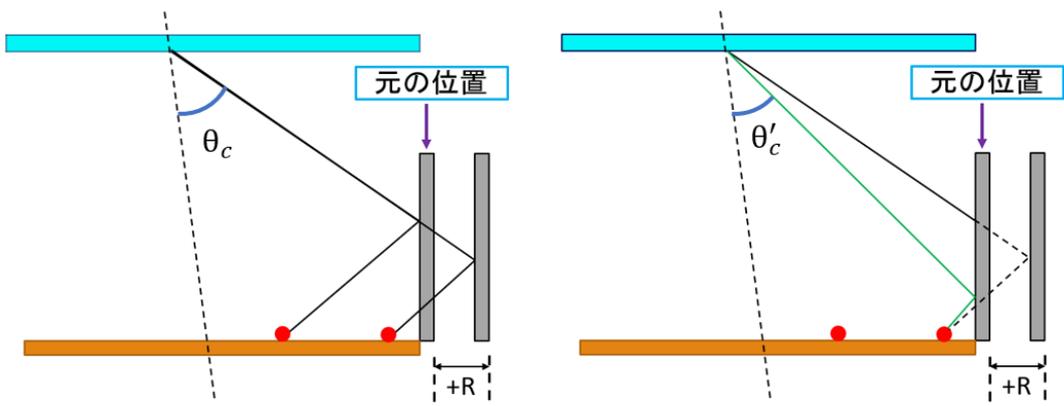


図 5.4 ミラーが $+R$ 方向（外側）へずれたときの概念図。外側にずれるとチェレンコフ角は小さく再構成されると予測される。

以下に +R 方向へミラーの位置を移動させたもののシミュレーション結果を示す。ヒストグラムは縦軸が $n\cos\theta_c$ 、横軸がミラーの ϕ となっている。+R 方向へ移動させた際は Chrenkov 角がちいさくなるため、 $n\cos\theta_c$ の値は大きくなると予測できる。

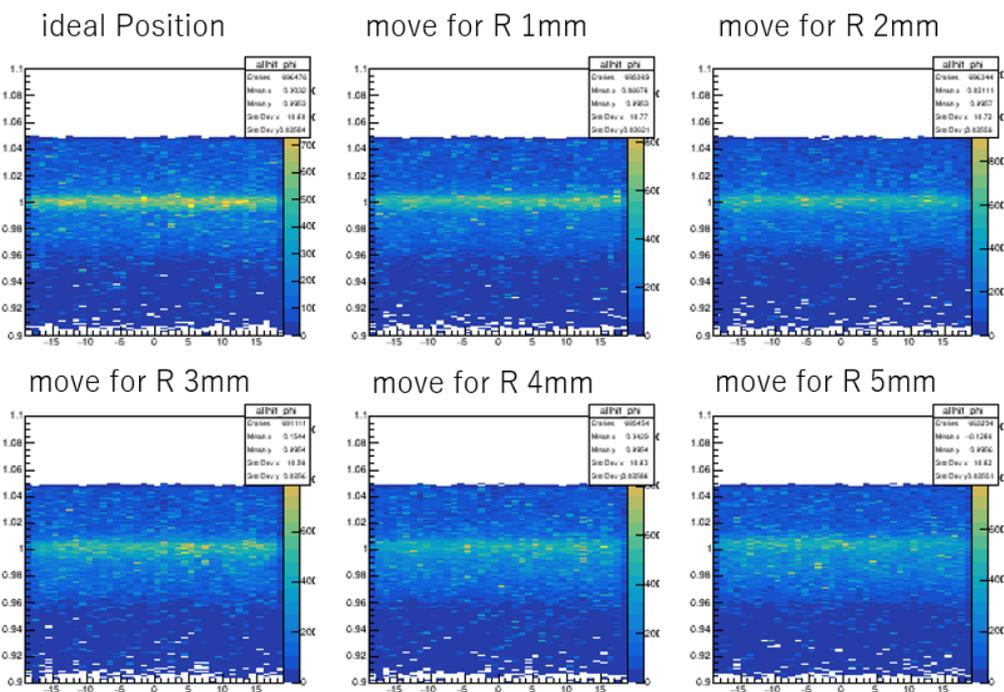


図 5.5 R 方向へ移動させたときのシミュレーション結果

次に、各 2 次元ヒストグラムの横軸を 10 分割し各スライスについて縦軸の $n\cos\theta_c$ 分布をそれぞれガウス+一次関数でフィットした際のピーク値を取ったグラフを示す。

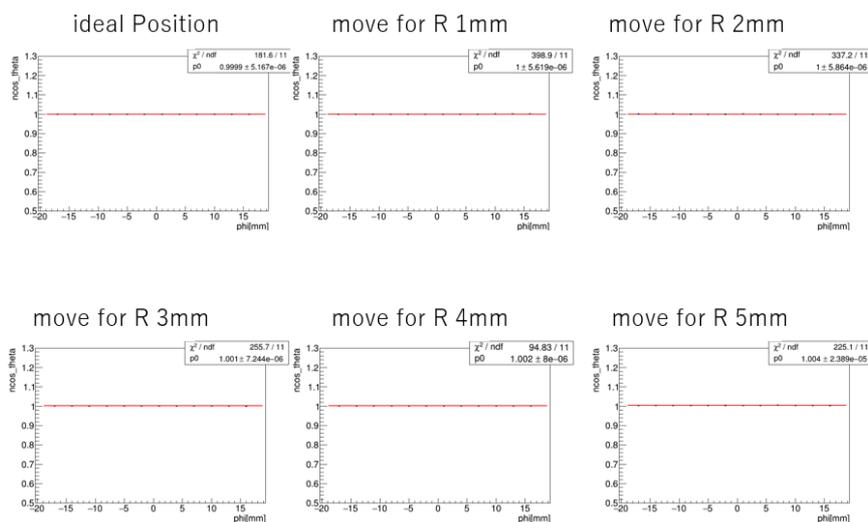


図 5.6 各 2 次元ヒストグラムの横軸を 10 分割し各スライスについて縦軸の $n\cos\theta_c$ 分布をフィットした結果のピーク値のグラフ

表 5.2 各 2 次元ヒストグラムの横軸を 10 分割し各スライスについて縦軸の $n\cos\theta_c$ 分布の、ピーク値をフィットした直線値と誤差

移動	直線と誤差	移動	直線と誤差
0mm	$1 \pm 7.86 * 10^{-6}$	3mm	$1.001 \pm 7.24 * 10^{-6}$
1mm	$1 \pm 5.62 * 10^{-6}$	4mm	$1.002 \pm 8 * 10^{-6}$
2mm	$1 \pm 5.86 * 10^{-6}$	5mm	$1.004 \pm 2.39 * 10^{-5}$

ミラーを +R 方向へ移動させた場合 ϕ に対する有意な依存性はなく、また $n\cos\theta_c$ の平均値もミラーを大きく移動させない限りあまり変化がないことがわかった。

また同じ +R 方向のシミュレーションで横軸を HAPD へ入射する際の入射角のコサイン $\cos \theta$ に変えたシミュレーション結果を示す。

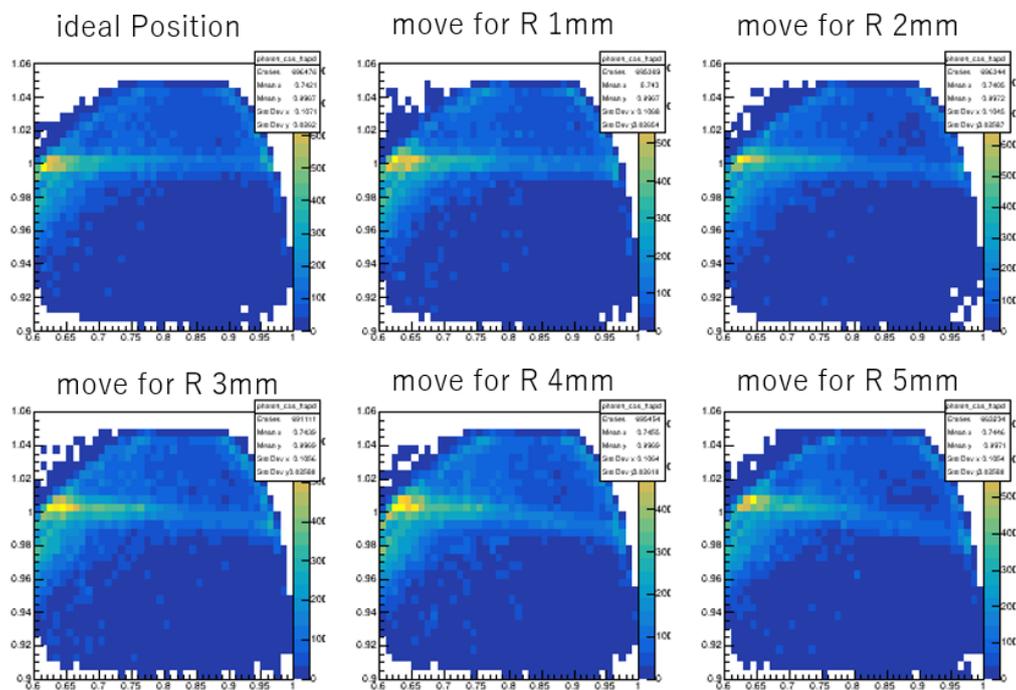


図 5.7 R 方向へ移動させたときのシミュレーション結果

次に、各 2 次元ヒストグラムの横軸を 10 分割し各スライスについて縦軸の $n\cos\theta_c$ 分布をそれをガウス+一次関数でフィットした際のピーク値を取ったグラフを示す。

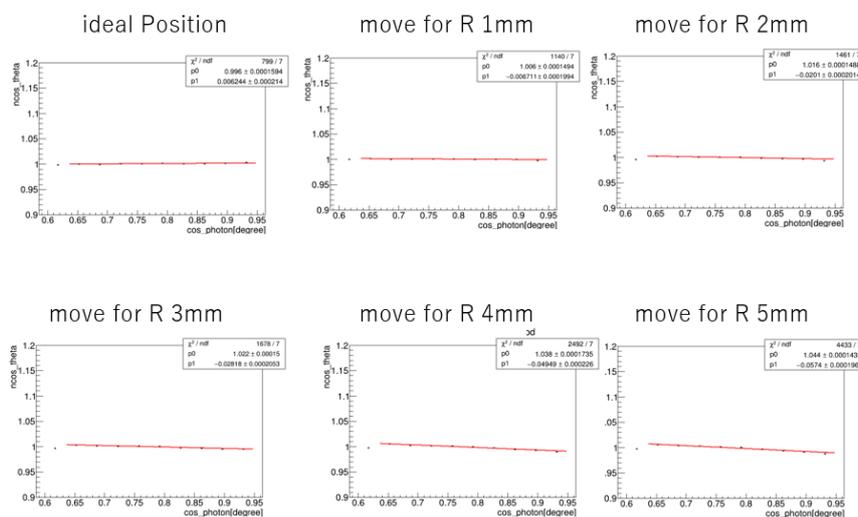


図 5.8 +R 方向へ各 2 次元ヒストグラムの横軸を 10 分割し各スライスについて縦軸の $n\cos\theta_c$ 分布を、フィットした結果のピーク値のグラフ

表 5.3 傾きと誤差

移動	傾きと誤差	移動	傾きと誤差
0mm	$(6.24 \pm 0.21) * 10^{-3}$	3mm	$(-2.82 \pm 0.02) * 10^{-2}$
1mm	$(-6.71 \pm 0.20) * 10^{-3}$	4mm	$(-4.95 \pm 0.02) * 10^{-2}$
2mm	$(-2.01 \pm 0.02) * 10^{-2}$	5mm	$(-5.74 \pm 0.02) * 10^{-2}$

+R 方向へのずれが大きいかほど負の傾きが大きいか一次関数的にずれることが確認できた。

さらに、各移動量について Cherenkov 角分布の σ についても確認した。Cherenkov 角分布と σ の値について示す。R 方向に位置が 4mm 程度ずれると Cherenkov 角の広がりは正しい位置にある場合の 1.8 倍を超える。チェレンコフ角の広がりには粒子識別性能に直接影響するため、数 mm 程度ミラーが R 方向にずれた場合は位置のアライメントが必要であると考えられる。

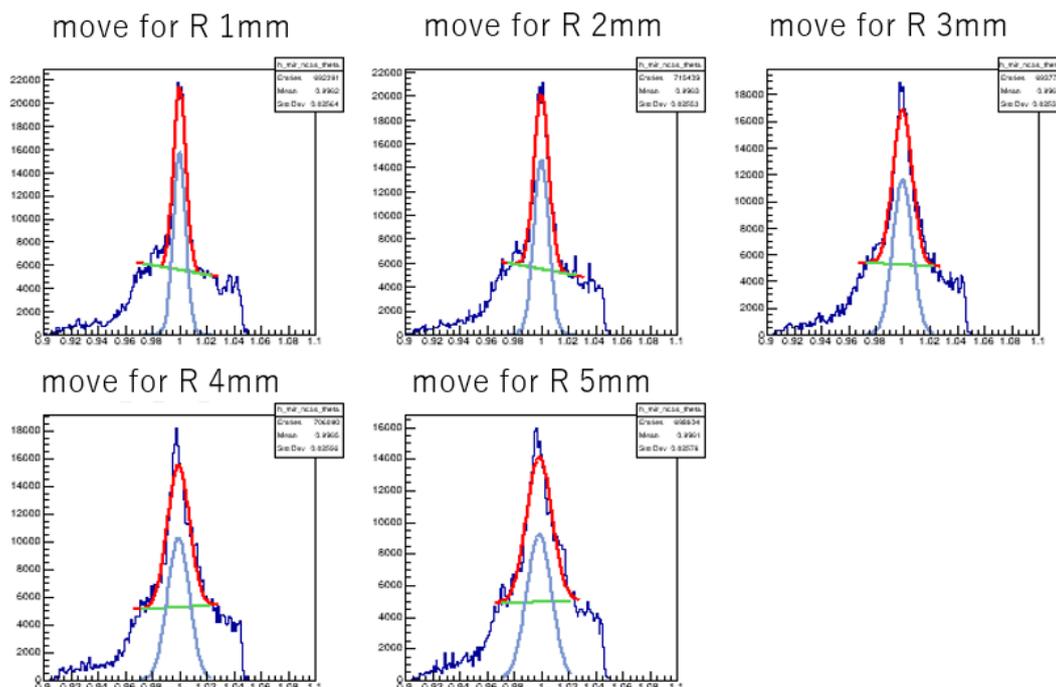


図 5.9 各移動についての σ Cherenkov 角分布の Fit 図

表 5.4 移動に対する σ の値

移動	σ と誤差	σ と誤差	
1mm	$(4.55 \pm 0.02) * 10^{-3}$	4mm	$(7.79 \pm 0.05) * 10^{-3}$
2mm	$(5.04 \pm 0.02) * 10^{-3}$	5mm	$(7.61 \pm 0.07) * 10^{-3}$
3mm	$(6.26 \pm 0.03) * 10^{-3}$		

次に-R へのシミュレーション結果を示す。ヒストグラムは縦軸が $n\cos\theta_c$ 、横軸がミラーの ϕ となっている。-R 方向へ移動させた際は Cherenkov 角が大きくなるため、 $n\cos\theta_c$ は小さくなると予測される。

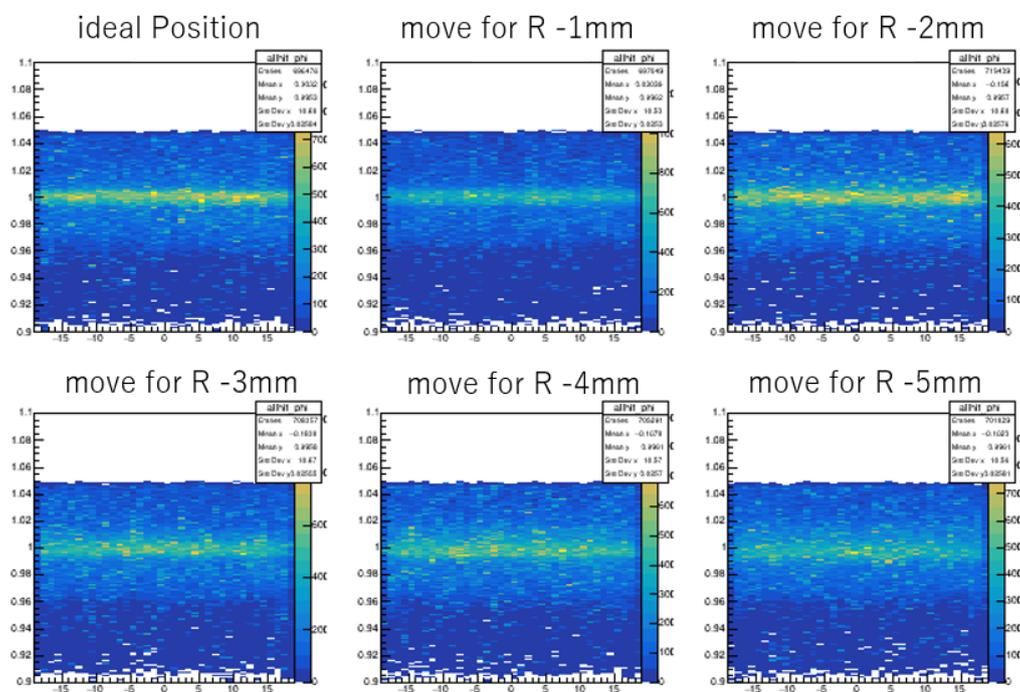


図 5.10 -R 方向へ移動させたシミュレーション結果

次に、各 2 次元ヒストグラムの横軸を 10 分割し各スライスについて縦軸の $n\cos\theta_c$ 分布をそれをガウス+一次関数でフィットした際のピーク置を取ったグラフを示す。

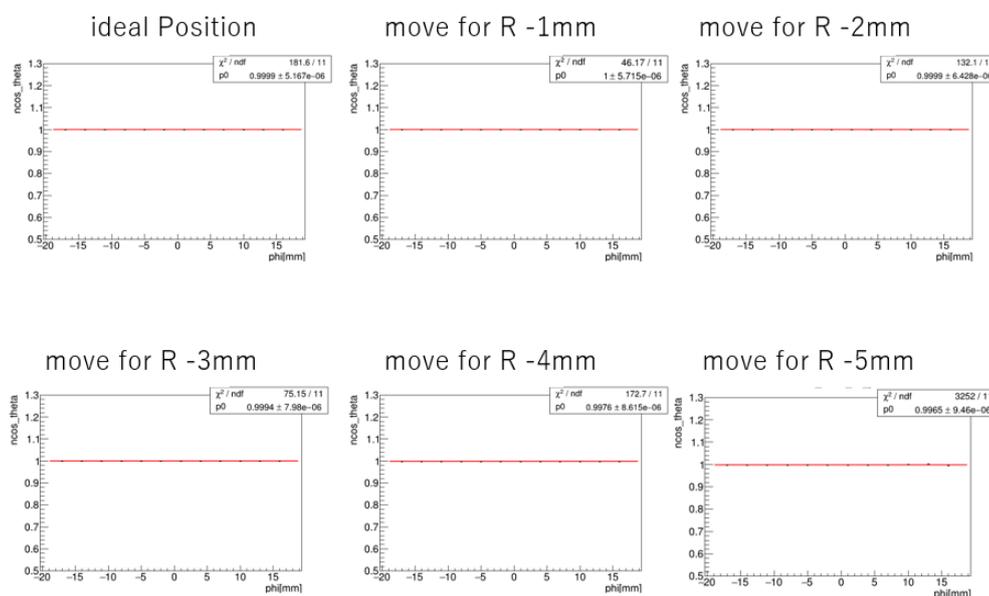


図 5.11 -R 方向への各 2 次元ヒストグラムの横軸を 10 分割し各スライスについて縦軸の $n\cos\theta_c$ 分布を、フィットした結果のピーク値のグラフ

表 5.5 -R 方向への各 2 次元ヒストグラムの横軸を 10 分割し各スライスについて縦軸の $n\cos\theta_c$ 分布を、ピーク値をフィットした直線値と誤差

移動	直線と誤差	移動	直線と誤差
0mm	$1 \pm 7.86 * 10^{-6}$	3mm	$0.9994 \pm 7.98 * 10^{-6}$
1mm	$1 \pm 5.76 * 10^{-6}$	4mm	$0.9976 \pm 8.61 * 10^{-6}$
2mm	$0.9999 \pm 6.43 * 10^{-6}$	5mm	$0.9965 \pm 9.46 * 10^{-6}$

ミラーを-R 方向へ移動させた場合 ϕ に対する有意な依存性はなく、また $n\cos\theta_c$ の平均値もミラーを大きく移動させない限りあまり変化がないことがわかった。

また同じ-R方向のシミュレーションで横軸を HAPD へ入射する際の $\cos \theta$ に変えたシミュレーション結果を示す。

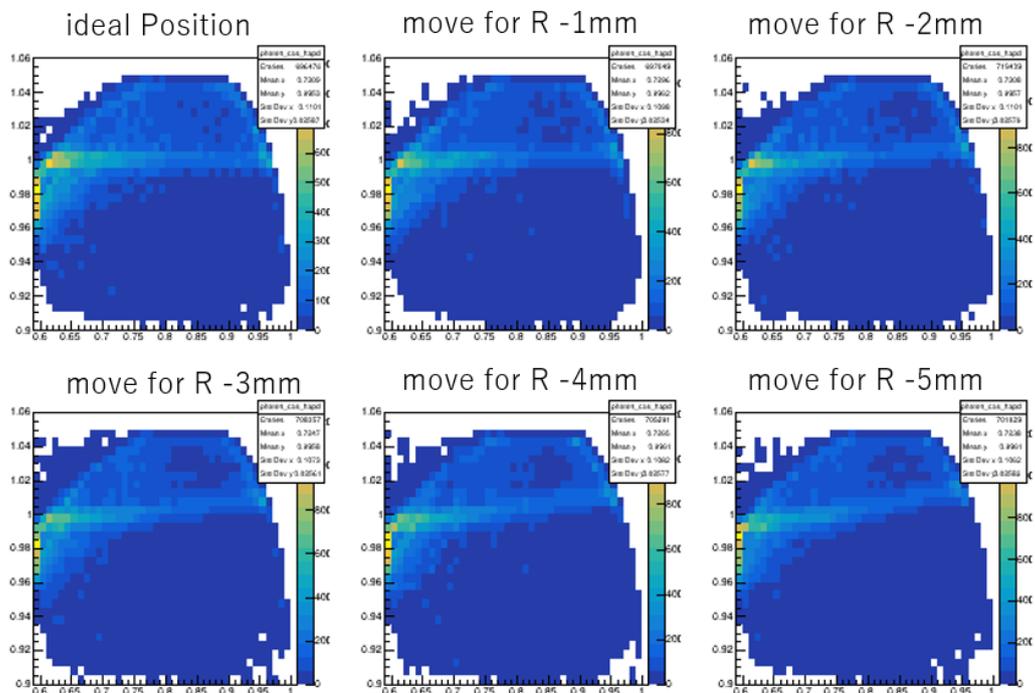


図 5.12 -R 方向へ移動させたときのシミュレーション結果

次に、各 2 次元ヒストグラムの横軸を 10 分割し各スライスについて縦軸の $ncos\theta_c$ 分布をそれぞれガウス+一次関数でフィットした際のピーク値を取ったグラフを示す。

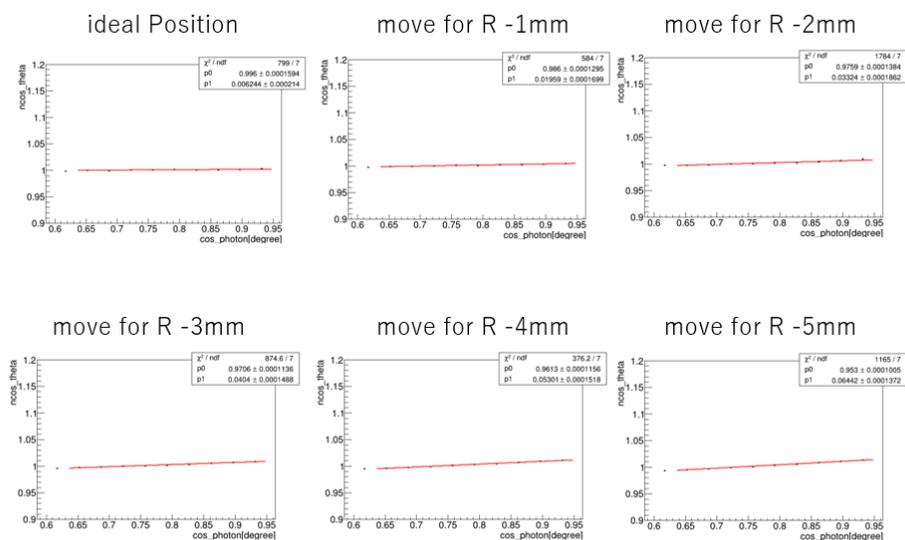


図 5.13 -R 方向への各 2 次元ヒストグラムの横軸を 10 分割し各スライスについて縦軸の $ncos\theta_c$ 分布を、フィットした結果のピーク値のグラフ

表 5.6 傾きと誤差

移動	傾きと誤差	移動	傾きと誤差
0mm	$(6.24 \pm 0.21) * 10^{-3}$	3mm	$(-2.82 \pm 0.02) * 10^{-2}$
1mm	$(-6.71 \pm 0.20) * 10^{-3}$	4mm	$(-4.95 \pm 0.02) * 10^{-2}$
2mm	$(-2.01 \pm 0.02) * 10^{-2}$	5mm	$(-5.74 \pm 0.02) * 10^{-2}$

さらに、各移動量について Cherenkov 角分布の σ についても確認した。Cherenkov 角分布と σ の値について示す。-R 方向に位置が 4mm 程度ずれると Cherenkov 角の広がりや正しい位置にある場合の 1.8 倍を超える。チェレンコフ角の広がりや粒子識別性能に直接影響するため、数 mm 程度ミラーが-R 方向にずれた場合も位置のアライメントが必要であると考えられる。

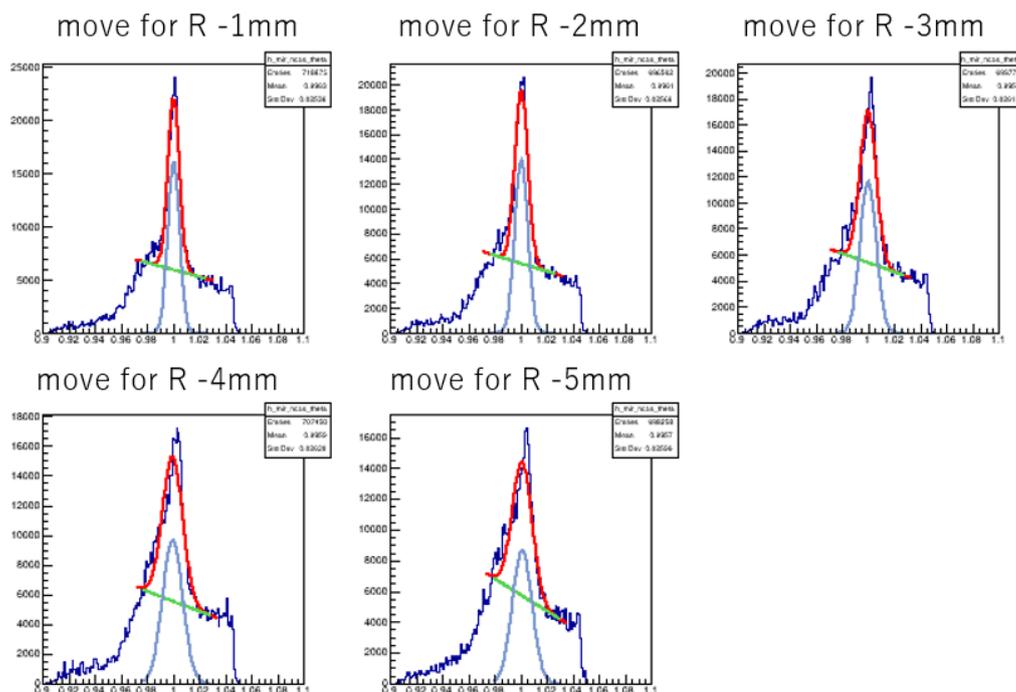


図 5.14 各移動についての σ Cherenkov 角分布の Fit 図

表 5.7 移動に対する σ の値

回転	σ と誤差	σ と誤差	
1mm	$(4.60 \pm 0.02) * 10^{-3}$	4mm	$(8.18 \pm 0.04) * 10^{-3}$
2mm	$(5.53 \pm 0.02) * 10^{-3}$	5mm	$(9.31 \pm 0.06) * 10^{-3}$
3mm	$(7.17 \pm 0.04) * 10^{-3}$		

各移動に対する傾きをグラフにしたものを図 5.15 へ示す。

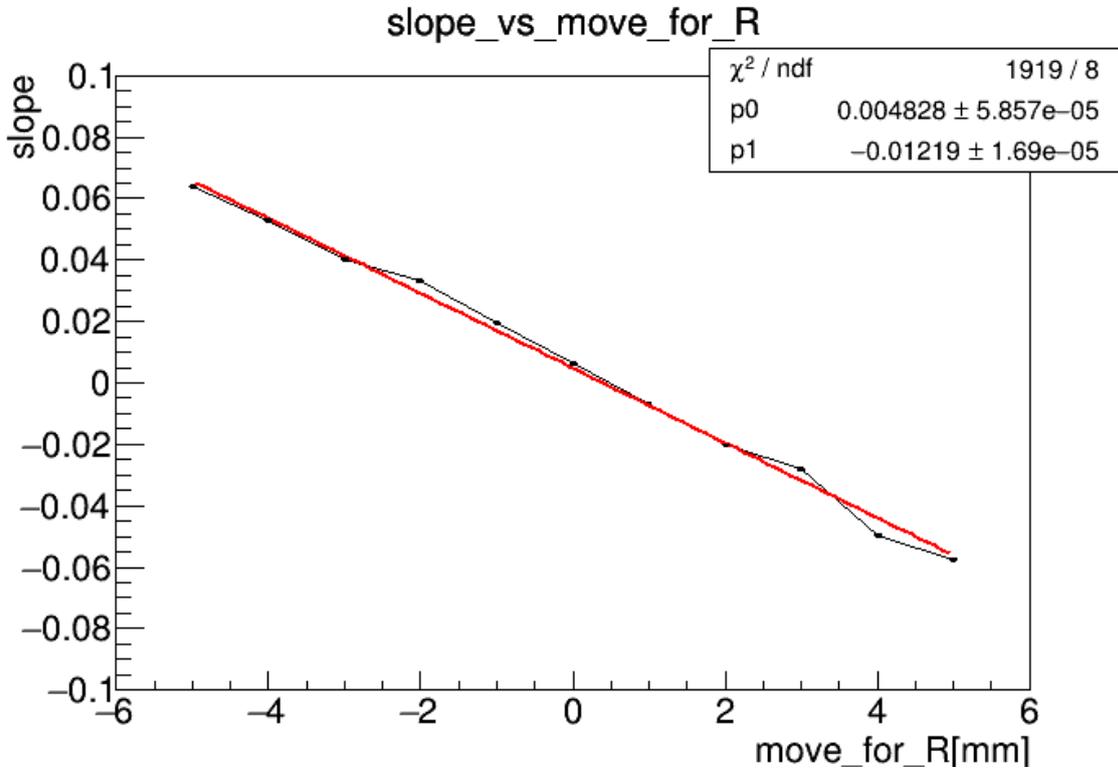


図 5.15 R 方向への各移動のズレをパラメータ化したグラフ

ミラーが R 方向にずれた場合は Cherenkov 角 θ_c が期待される位置からずれることがわかった。また、HAPD に対する光子の入射角 θ をパラメータとして検出できることがわかった。 $n \cos \theta_c$ の依存性は

$$n \cos \theta_c = \alpha \cos \theta_c + \text{const} \quad (5.1)$$

と表される。ここで $\alpha = 0.00483 - 0.01219 \times R[\text{mm}]$ と表され、 $n \cos \theta_c$ の θ 依存性を調べその傾きからミラーの R 方向のずれの大き果を見積もることができることがわかった。

5.1.3 ϕ 方向へのミラーの回転のシミュレーション

ミラーが ϕ 方向へ回転した場合の概念図を図 5.16 へ示す。ミラーが $+\phi$ 方向へ回転した際は $\phi=0$ が奥側へくるため傾きが正の一次関数的に分布すると予測される。ミラーの端の部分が $1\text{mm}\sim 5\text{mm}$ へなるようそれぞれの場合について回転シミュレーションを行った。

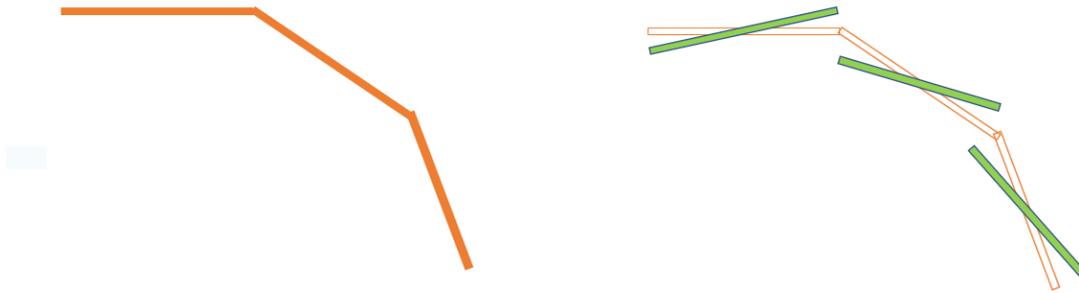


図 5.16 ミラーが $+\phi$ 方向へ回転したときの概念図。

以下に ϕ 方向への回転シミュレーションの結果を示す。図5.20は+方向（反時計回り）への回転シミュレーションを行った結果である。

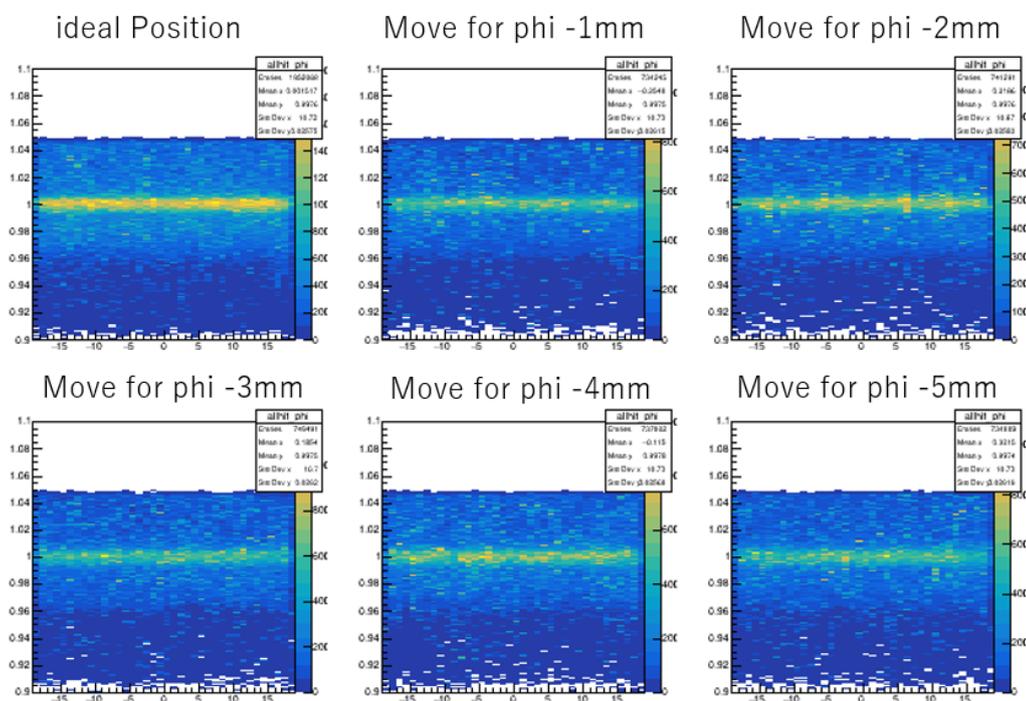


図 5.17 ϕ 方向へ時計回りに回転させたシミュレーション結果

次に、各 2 次元ヒストグラムの横軸を 10 分割し各スライスについて縦軸の $n\cos\theta_c$ 分布をそれをガウス+一次関数でフィットした際のピーク値を取ったグラフを示す。

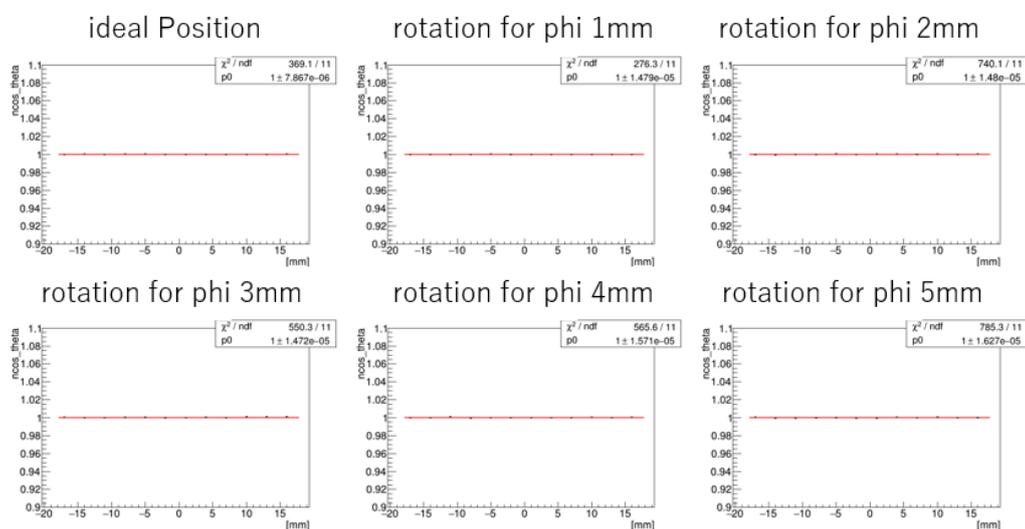


図 5.18 各 2 次元ヒストグラムの横軸を 10 分割し各スライスについて縦軸の $n\cos\theta_c$ 分布を、フィットした結果のピーク値のグラフ

表 5.8 直線値と誤差

回転	直線と誤差	回転	直線と誤差
0mm	$1 \pm 7.86 \times 10^{-6}$	3mm	$1 \pm 1.47 \times 10^{-5}$
1mm	$1 \pm 1.48 \times 10^{-5}$	4mm	$1 \pm 1.57 \times 10^{-5}$
2mm	$1 \pm 1.48 \times 10^{-5}$	5mm	$1 \pm 1.63 \times 10^{-5}$

また、各回転について Cherenkov 角分布の σ についても確認した。Cherenkov 角分布と σ の値について示す。 ϕ 方向へミラーが回転した場合には Cherenkov 角分布は殆ど広がらず、端の位置で 5mm ずれたときにもチェレンコフ角の広がりは 10% 程度しか増加しない。そのため、 ϕ 方向へのミラーの回転については、検出が困難でありかつアライメント自体も不要であると考えられる。

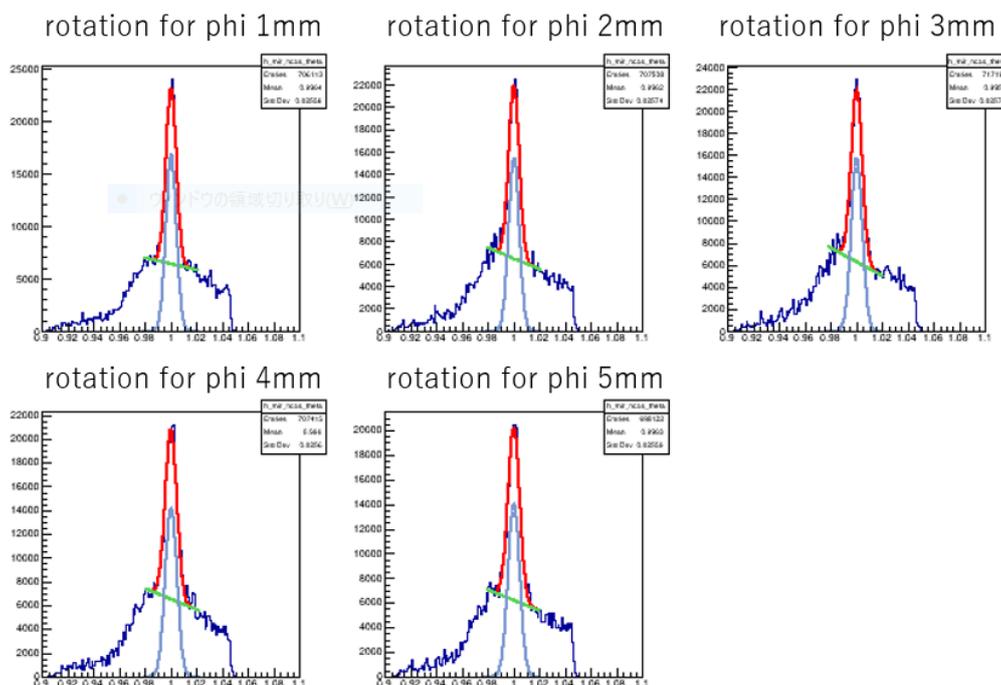


図 5.19 各回転についての σ Cherenkov 角分布の Fit 図

表 5.9 回転に対する σ の値

回転	σ と誤差	σ と誤差	
1mm	$(4.05 \pm 0.02) * 10^{-3}$	4mm	$(4.57 \pm 0.02) * 10^{-3}$
2mm	$(4.15 \pm 0.02) * 10^{-3}$	5mm	$(4.57 \pm 0.02) * 10^{-3}$
3mm	$(4.35 \pm 0.02) * 10^{-3}$		

以下に- ϕ 方向への回転シミュレーション（時計回り）の結果を示す。

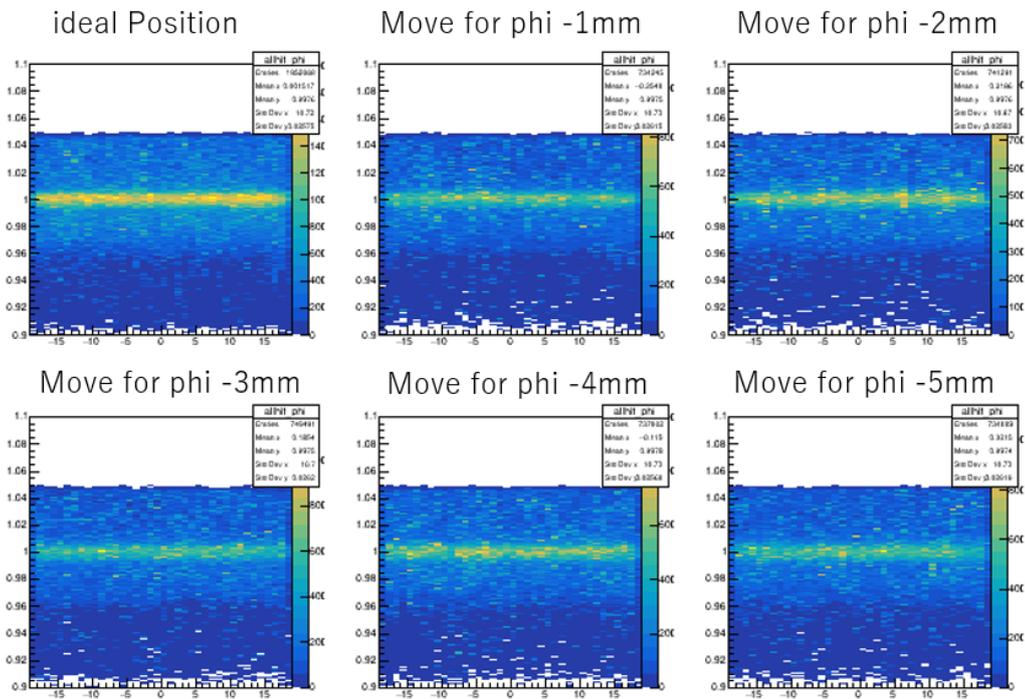


図 5.20 ϕ 方向へ反時計回りに回転させたシミュレーション結果

同様に各 2 次元ヒストグラムの横軸を 10 分割し各スライスについて縦軸の $ncos\theta_c$ 分布をそれをガウス+一次関数でフィットした際のピーク値を取ったグラフを示す。

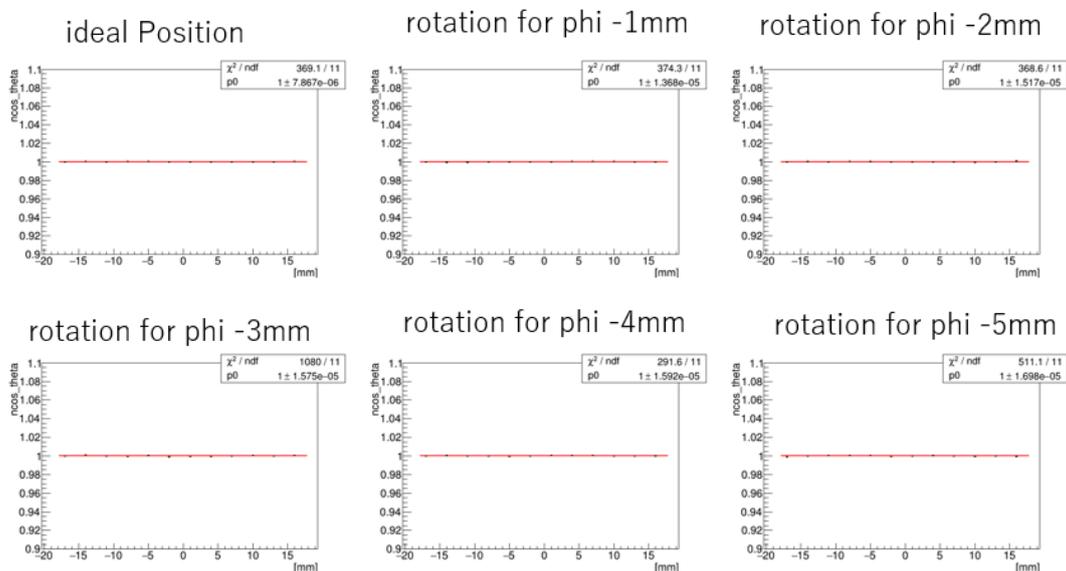


図 5.21 $-\phi$ 方向への各 2 次元ヒストグラムの横軸を 10 分割し各スライスについて縦軸の $ncos\theta_c$ 分布を、フィットした結果のピーク値のグラフ

表 5.10 直線値と誤差

回転	直線と誤差	回転	直線と誤差
0mm	$1 \pm 7.86 \times 10^{-6}$	-3mm	$1 \pm 1.58 \times 10^{-5}$
-1mm	$1 \pm 1.37 \times 10^{-5}$	-4mm	$1 \pm 1.59 \times 10^{-5}$
-2mm	$1 \pm 1.51 \times 10^{-5}$	-5mm	$1 \pm 1.70 \times 10^{-5}$

また、各回転について Cherenkov 角分布の σ についても確認した。Cherenkov 角分布と σ の値について示す。

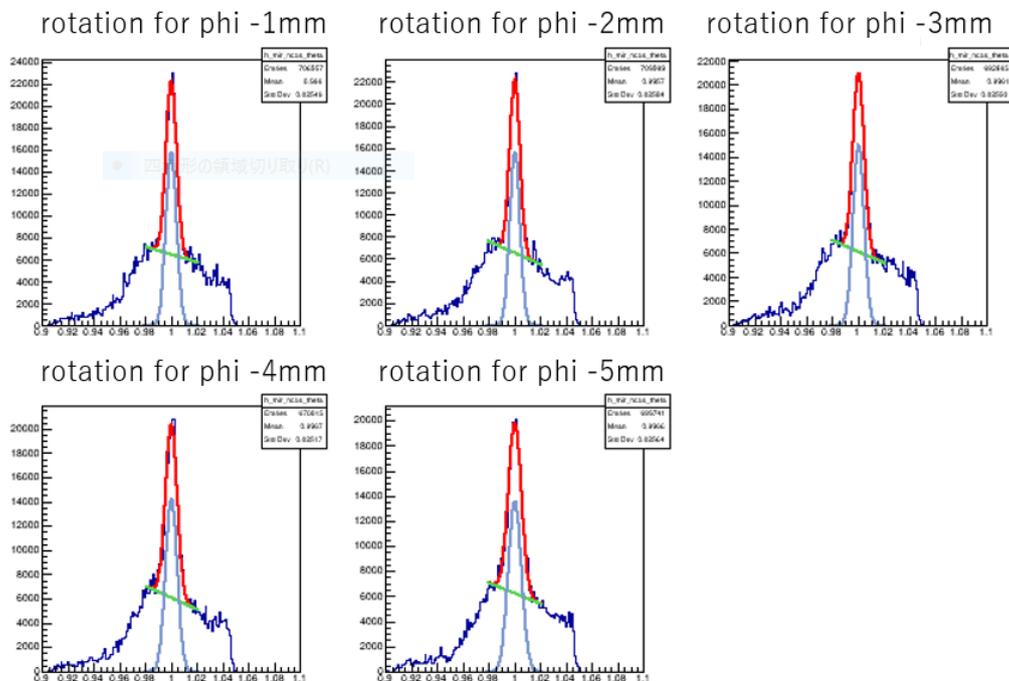


図 5.22 各回転についての σ Cherenkov 角分布の Fit 図

表 5.11 回転に対する σ の値

回転	σ と誤差	σ と誤差	
1mm	$(4.15 \pm 0.02) * 10^{-3}$	4mm	$(4.47 \pm 0.02) * 10^{-3}$
2mm	$(3.99 \pm 0.02) * 10^{-3}$	5mm	$(5.10 \pm 0.02) * 10^{-3}$
3mm	$(4.35 \pm 0.02) * 10^{-3}$		

ミラーが ϕ 方向に回転した場合には $n \cos \theta_c$ に変化はみられずまた σ の値についても R 方向への移動、次に記述する θ 方向への回転に比べ変化が少なく、粒子識別性能には影響を及ぼさないと考えられる。

5.1.4 θ 方向へのミラーの回転シミュレーション

以下が $+\theta$ 方向へ回転した場合を考える。 $+\theta$ 方向へ回転したときの概念図を図 5.23 へ示す。回転した際に $z=0$ が奥側へずれるため傾きが正の 1 次関数になると予測される。ミラーの端が 1mm~5mm になるようにシミュレーションを行った。

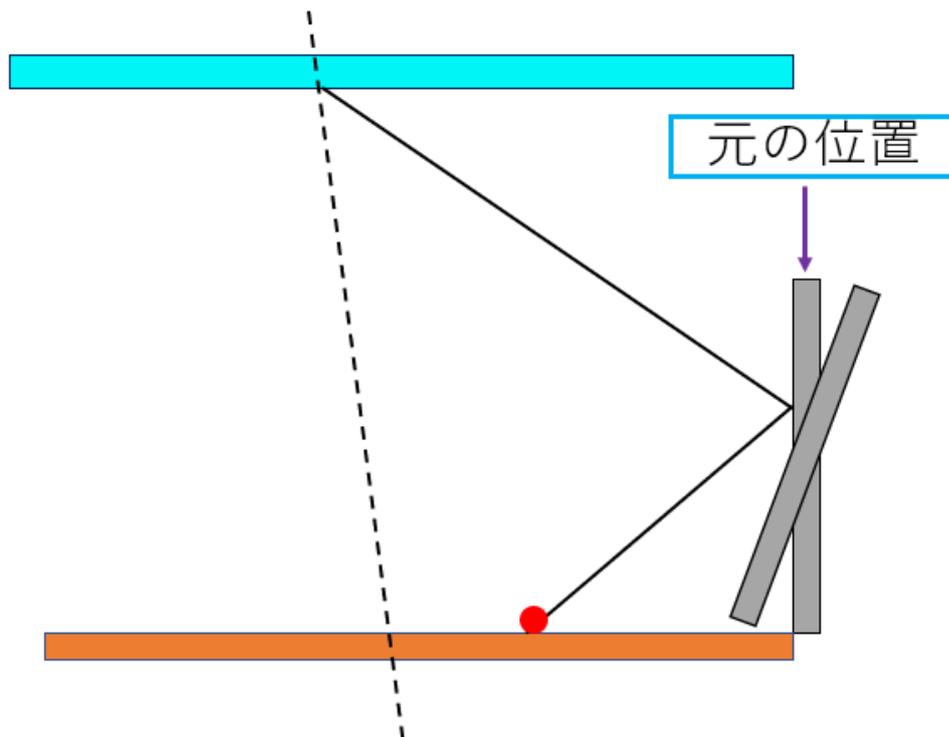


図 5.23 ミラーが $+\theta$ 方向へ回転したときの概念図。

以下に $+\theta$ 方向へのシミュレーション（反時計回り）結果を示す。

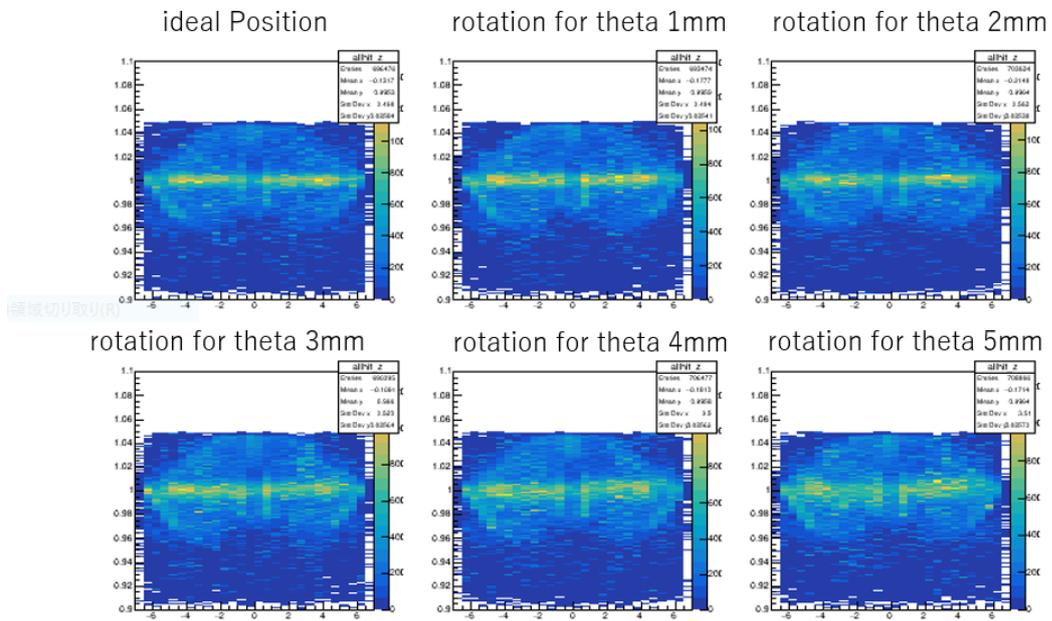


図 5.24 θ 方向へ反時計回りに 1mm~5mm 回転させたシミュレーション結果

次に、各 2 次元ヒストグラムの横軸を 10 分割し各スライスについて縦軸の $n\cos\theta_c$ 分布をそれをガウス+一次関数でフィットした際のピーク位置を取ったグラフを示す。

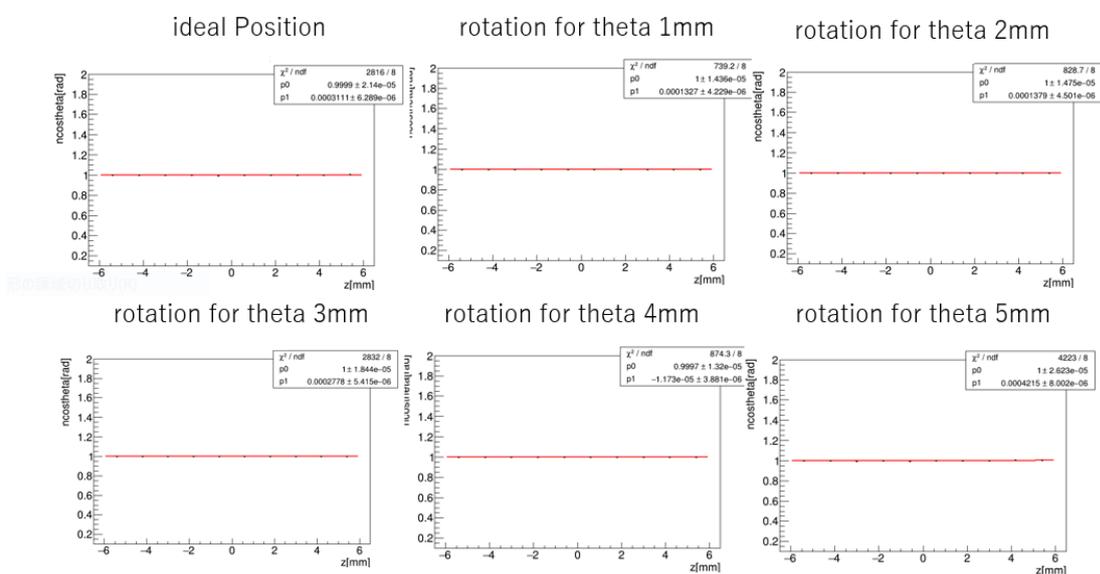


図 5.25 + θ 方向への各 2 次元ヒストグラムの横軸を 10 分割し各スライスについて縦軸の $n\cos\theta_c$ 分布を、フィットした結果のピーク値のグラフ

表 5.12 傾きと誤差

回転	傾きと誤差	回転	傾きと誤差
0mm	$(-1.17 \pm 0.39) * 10^{-5}$	3mm	$(2.78 \pm 0.05) * 10^{-4}$
1mm	$(1.33 \pm 0.04) * 10^{-4}$	4mm	$(3.11 \pm 0.06) * 10^{-4}$
2mm	$(1.38 \pm 0.04) * 10^{-4}$	5mm	$(4.22 \pm 0.08) * 10^{-4}$

予測通り + θ 方向への回転が大きくなると正の一次関数的にずれることが確認できた。

また、各回転について Cherenkov 角分布の σ についても確認した。Cherenkov 角分布と σ の値について示す。 θ 方向に回転した場合、ミラーの端位置で 4mm 程度ずれるとチェレンコフ角の拡がりは正しい位置にある場合の 1.5 倍を超える。チェレンコフ角の拡がりは粒子識別性能に直接影響するため、端の位置で数 mm 程度ミラーが θ 方向に回転した場合には、位置のアライメントが必要であると考えられる。

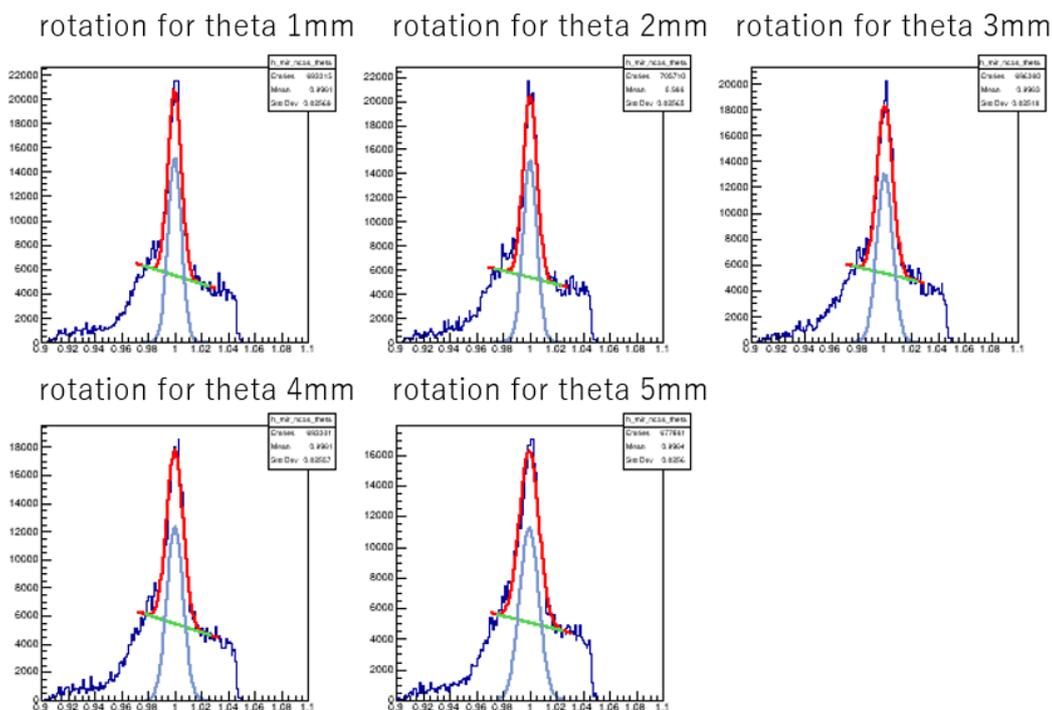


図 5.26 各回転についての σ Cherenkov 角分布の Fit 図

表 5.13 回転に対する σ の値

回転	σ と誤差	σ と誤差	
1mm	$(5.06 \pm 0.02) * 10^{-3}$	4mm	$(6.17 \pm 0.03) * 10^{-3}$
2mm	$(5.23 \pm 0.02) * 10^{-3}$	5mm	$(7.29 \pm 0.03) * 10^{-3}$
3mm	$(5.97 \pm 0.03) * 10^{-3}$		

次に $-\theta$ 方向（時計回り）へのシミュレーション結果を示す。

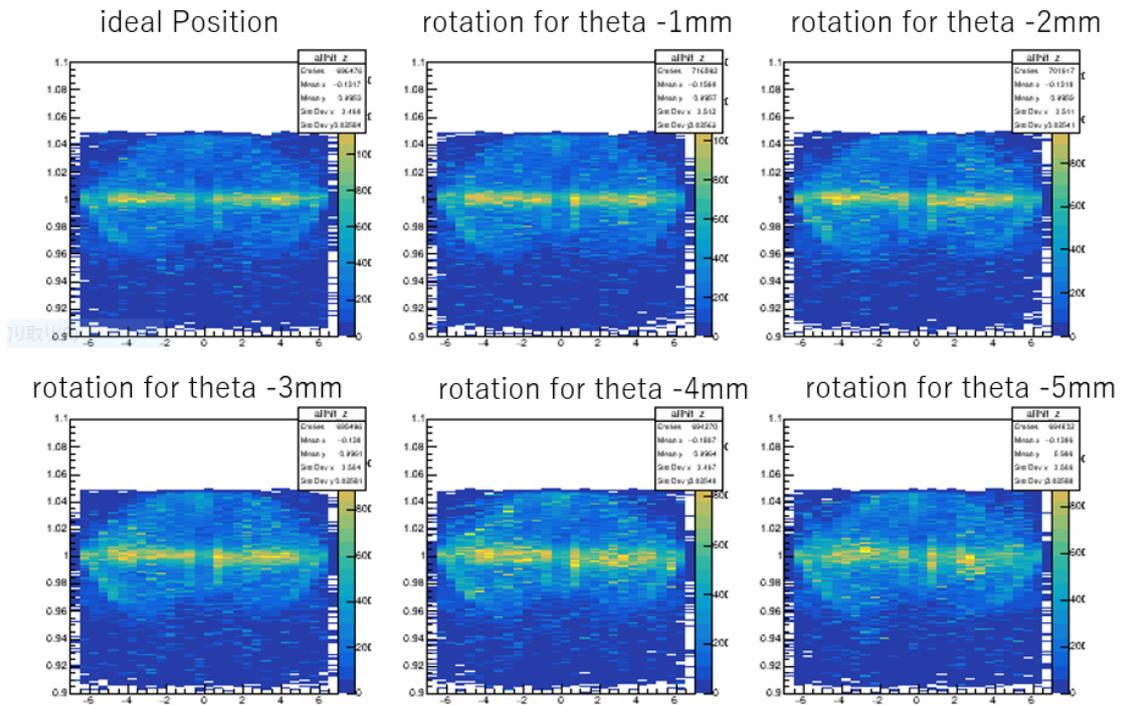


図 5.27 θ 方向へ反時計回りに-1mm~5mm 回転させたシミュレーション結果

次に、各 2 次元ヒストグラムの横軸を 10 分割し各スライスについて縦軸の $n\cos\theta_c$ 分布をそれをガウス+一次関数でフィットした際のピーク位置を取ったグラフを示す。

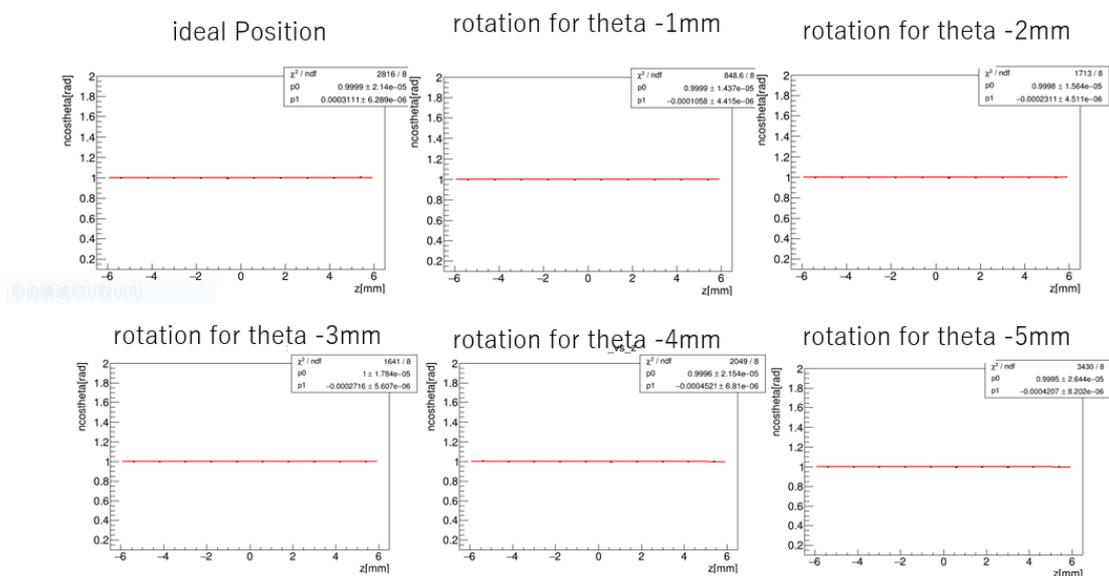


図 5.28 $-\theta$ 方向への各 2 次元ヒストグラムの横軸を 10 分割し各スライスについて縦軸の $n\cos\theta_c$ 分布を、フィットした結果のピーク値のグラフ

表 5.14 傾きと誤差

回転	傾きと誤差	回転	傾きと誤差
0mm	$(-1.17 \pm 0.39) \times 10^{-5}$	-3mm	$(-2.71 \pm 0.06) \times 10^{-4}$
-1mm	$(-1.06 \pm 0.04) \times 10^{-4}$	-4mm	$(-4.25 \pm 0.16) \times 10^{-4}$
-2mm	$(-2.31 \pm 0.05) \times 10^{-4}$	-5mm	$(-4.21 \pm 0.08) \times 10^{-4}$

また、各回転について Cherenkov 角分布の σ についても確認した。Cherenkov 角分布と σ の値について示す。 $-\theta$ 方向に回転した場合も、ミラーの端位置で 4mm 程度ずれるとチェレンコフ角の拡がりは正しい位置にある場合の 1.5 倍を超える。チェレンコフ角の拡がりには粒子識別性能に直接影響するため、端の位置で数 mm 程度ミラーが θ 方向に回転した場合にも、位置のアライメントが必要であると考えられる。

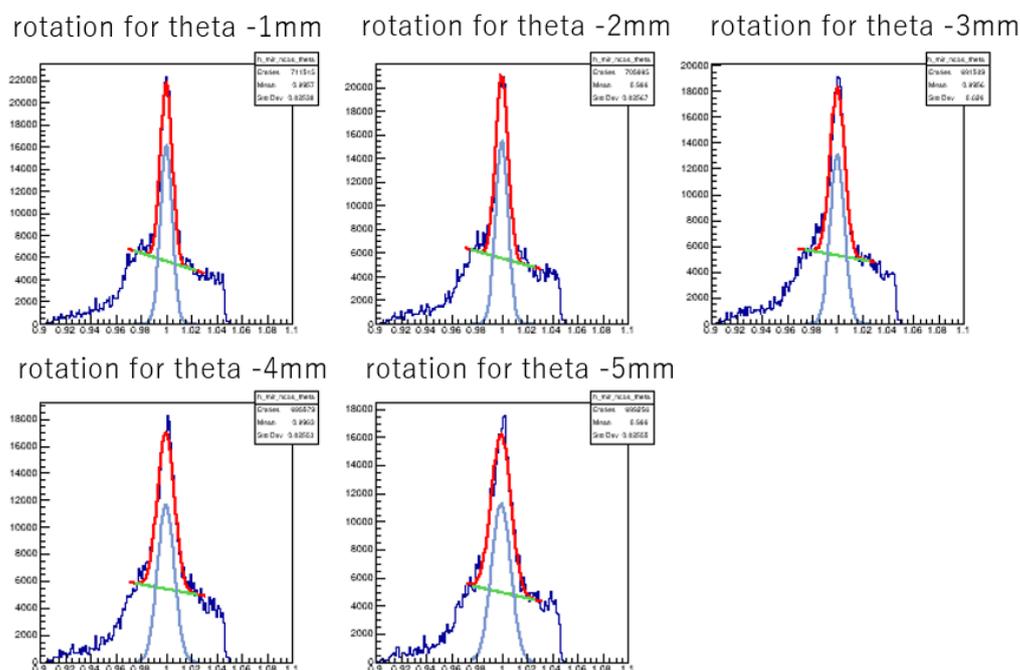


図 5.29 各回転についての σ Cherenkov 角分布の Fit 図

表 5.15 回転に対する σ の値

回転	σ と誤差	σ と誤差	
1mm	$(4.72 \pm 0.02) * 10^{-3}$	4mm	$(6.74 \pm 0.03) * 10^{-3}$
2mm	$(5.01 \pm 0.02) * 10^{-3}$	5mm	$(7.70 \pm 0.03) * 10^{-3}$
3mm	$(5.74 \pm 0.02) * 10^{-3}$		

各回転に対して傾きとのグラフを図 5.30 へ示す。

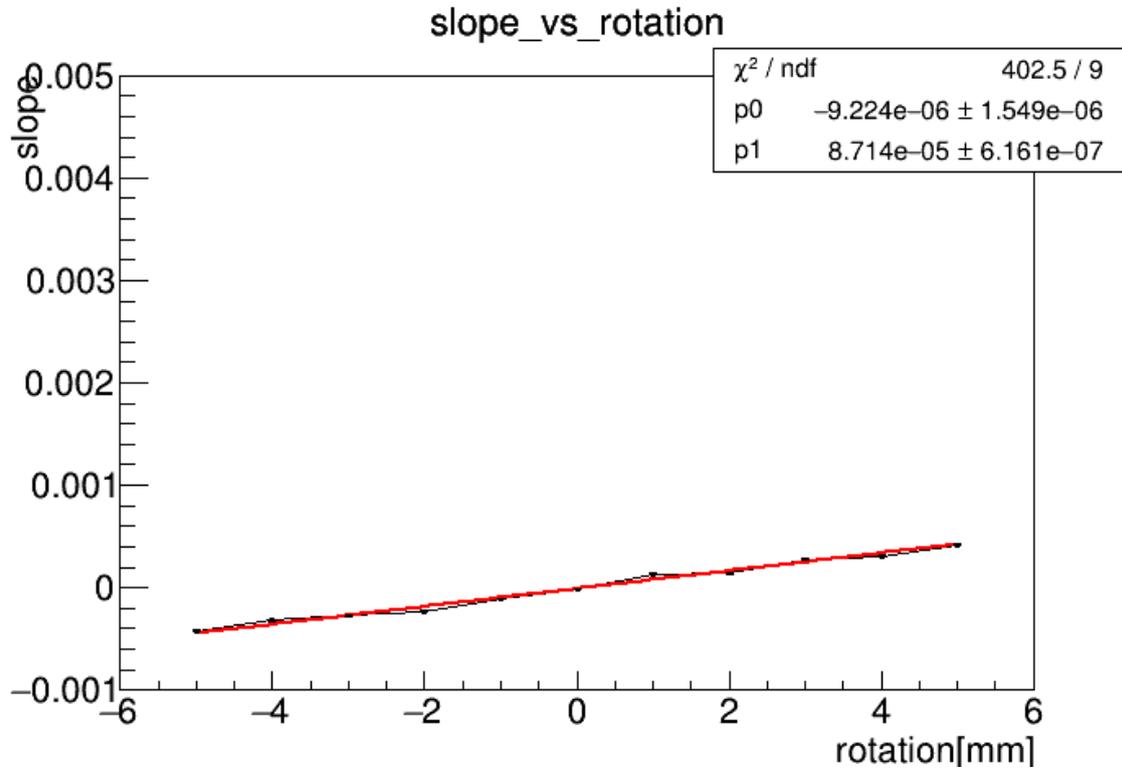


図 5.30 フィットした傾きと回転のグラフ

ミラーが θ 方向に回転した場合は Cherenkov 角 θ_c が期待される値からずれることがわかった。またそのずれはミラーのヒット位置 z をパラメータとして検出できることがわかった。 $n \cos \theta_c$ の z 依存性は

$$n \cos \theta_c = \alpha z + const \quad (5.2)$$

と表すことができる。ここで $\alpha = -9.2 \times 10^{-6} + 8.71 \times 10^{-5} \times \theta$ [degree] と表されることがわかった。 $n \cos \theta_c$ の z 依存性を調べその傾きからミラーの θ 方向の回転角を見積もることができることがわかった。

5.2 実データへの適用

実データでの結果を以下へ示す。実データでは各ミラーごとのずれを測定するため1~18枚ミラーそれぞれについてヒストグラムを作成した。

5.2.1 横軸 ϕ の結果

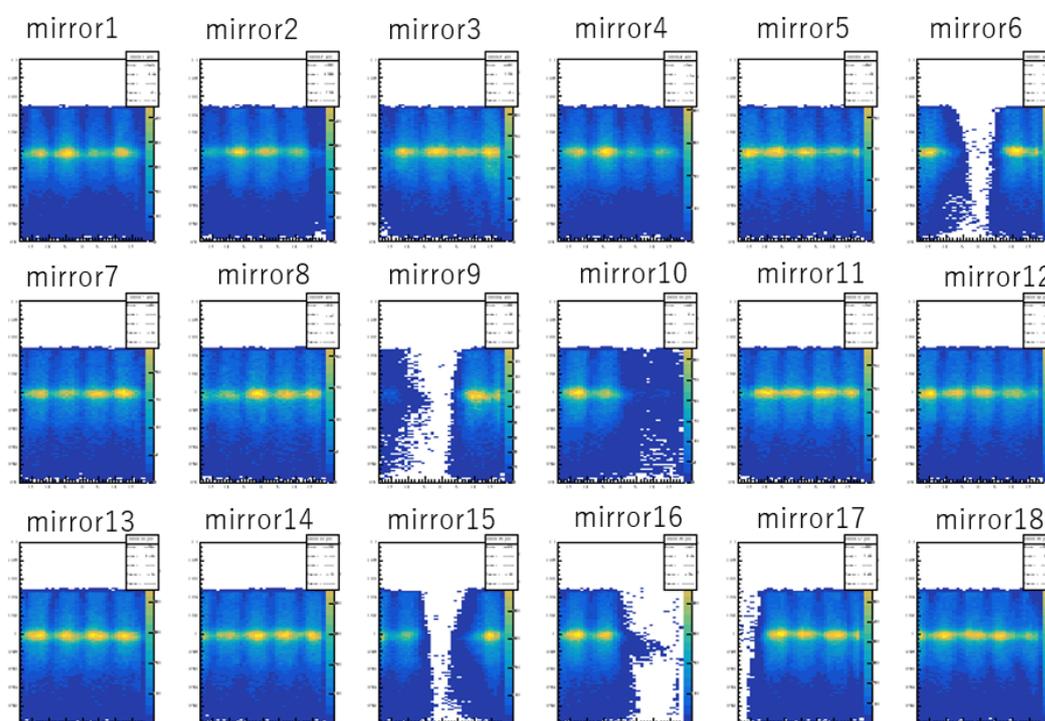


図 5.31 実データでの横軸 ϕ の各ミラーにおける $n \cos \theta_c$ 分布

5.2.2 θ 回転の見積もり

θ 回転への補正は R 方向の補正に依存するため、はじめに θ 方向についての補正を行う。図 5.32 は各ミラーについて縦軸 $n \cos \theta_c$ 、横軸 Z のヒストグラムを作成したものである。 θ 方向の回転を見積もるため各ヒストグラムの傾きをフィットした結果を表 5.16 へ示す。

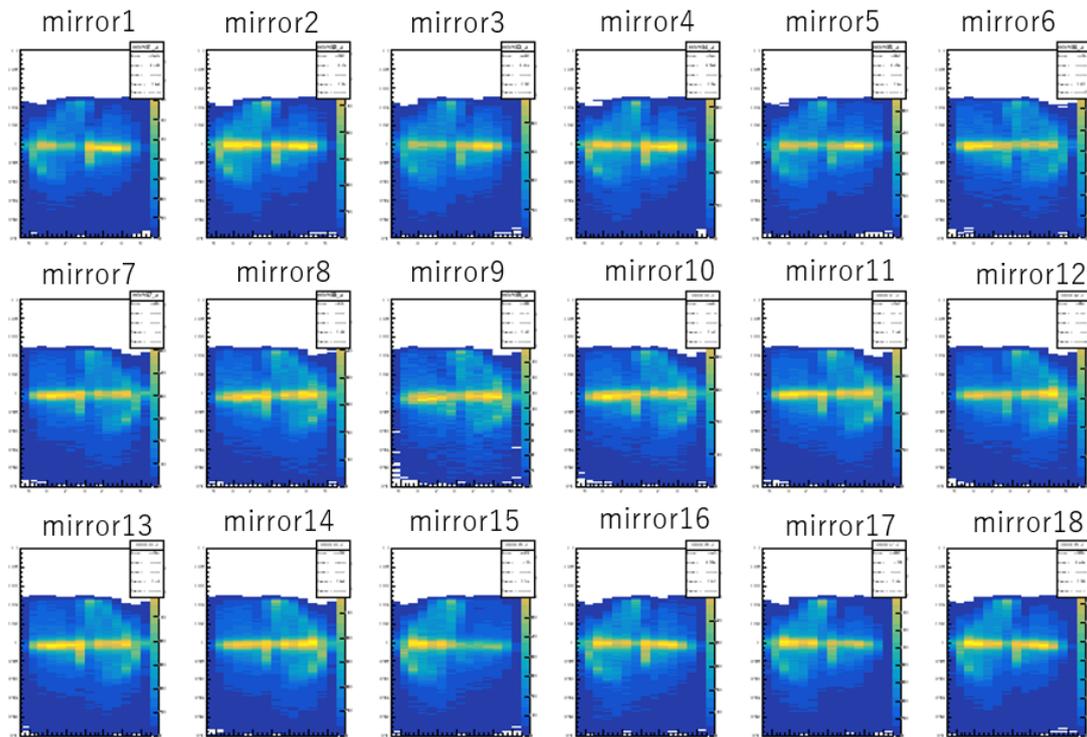


図 5.32 実データでの横軸 Z の各ミラーにおける $n \cos \theta_c$ 分布

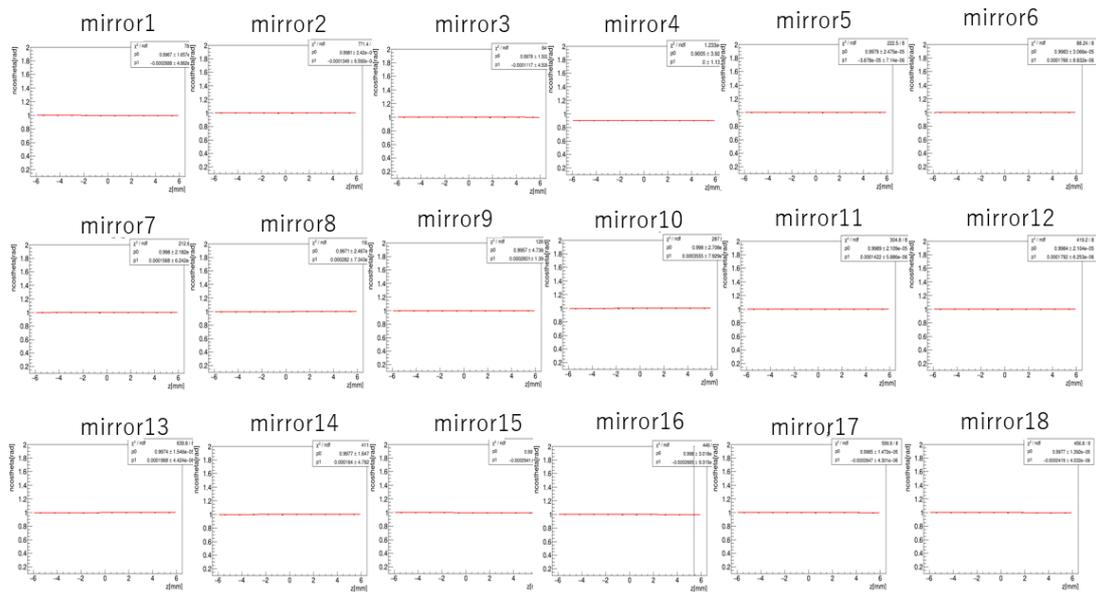


図 5.33 各ミラーを Y 軸へプロジェクションし、フィットした結果のピーク値のグラフ

表 5.16 傾きと誤差

ミラー番号	傾きと誤差	ミラー番号	傾きと誤差
ミラー 1	$(-2.89 \pm 0.05) * 10^{-4}$	ミラー 10	$(3.56 \pm 0.08) * 10^{-4}$
ミラー 2	$(-1.02 \pm 0.5) * 10^{-4}$	ミラー 11	$(1.43 \pm 0.06) * 10^{-4}$
ミラー 3	$(-1.35 \pm 0.07) * 10^{-4}$	ミラー 12	$(1.79 \pm 0.06) * 10^{-4}$
ミラー 4	$(-1.12 \pm 0.05) * 10^{-4}$	ミラー 13	$(1.97 \pm 0.04) * 10^{-4}$
ミラー 5	$(-3.68 \pm 0.71) * 10^{-5}$	ミラー 14	$(1.64 \pm 0.05) * 10^{-4}$
ミラー 6	$(1.77 \pm 00.09) * 10^{-4}$	ミラー 15	$(-2.94 \pm 0.07) * 10^{-4}$
ミラー 7	$(1.57 \pm 0.06) * 10^{-4}$	ミラー 16	$(-2.89 \pm 0.09) * 10^{-4}$
ミラー 8	$(2.82 \pm 0.07) * 10^{-4}$	ミラー 17	$(-2.85 \pm 0.04) * 10^{-4}$
ミラー 9	$(2.65 \pm 0.01) * 10^{-4}$	ミラー 18	$(-2.42 \pm 0.04) * 10^{-4}$

フィット結果 (表 5.16) とシミュレーション結果の表 5.30 より得られたパラメーターを用いて予測した θ 方向のズレを表 5.17 へ示す。

表 5.17 ミラーの θ 方向への回転

ミラー番号	θ 方向の回転 (degree)	ミラー番号	θ 方向の回転 (degree)
ミラー 1	-1.269 ± 0.058	ミラー 10	1.337 ± 0.092
ミラー 2	-0.817 ± 0.06	ミラー 11	1.048 ± 0.07
ミラー 3	-0.965 ± 0.078	ミラー 12	1.137 ± 0.074
ミラー 4	-0.868 ± 0.055	ミラー 13	1.171 ± 0.054
ミラー 5	-0.305 ± 0.083	ミラー 14	1.105 ± 0.056
ミラー 6	1.135 ± 0.103	ミラー 15	-1.274 ± 0.084
ミラー 7	1.088 ± 0.073	ミラー 16	-1.269 ± 0.108
ミラー 8	1.280 ± 0.086	ミラー 17	-1.265 ± 0.052
ミラー 9	1.263 ± 0.159	ミラー 18	-1.213 ± 0.039

表 5.17 の値を用いて補正を行い、再び θ 方向への結果を以下へ示す。

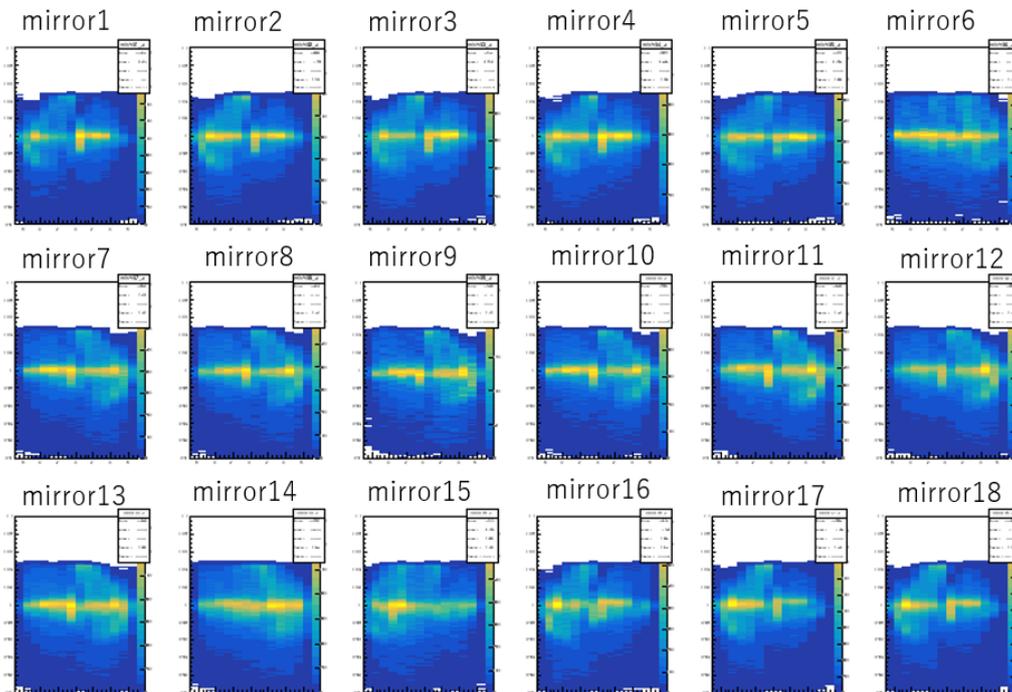


図 5.34 補正後の横軸 z の各ミラーにおける $n \cos \theta_c$ 分布

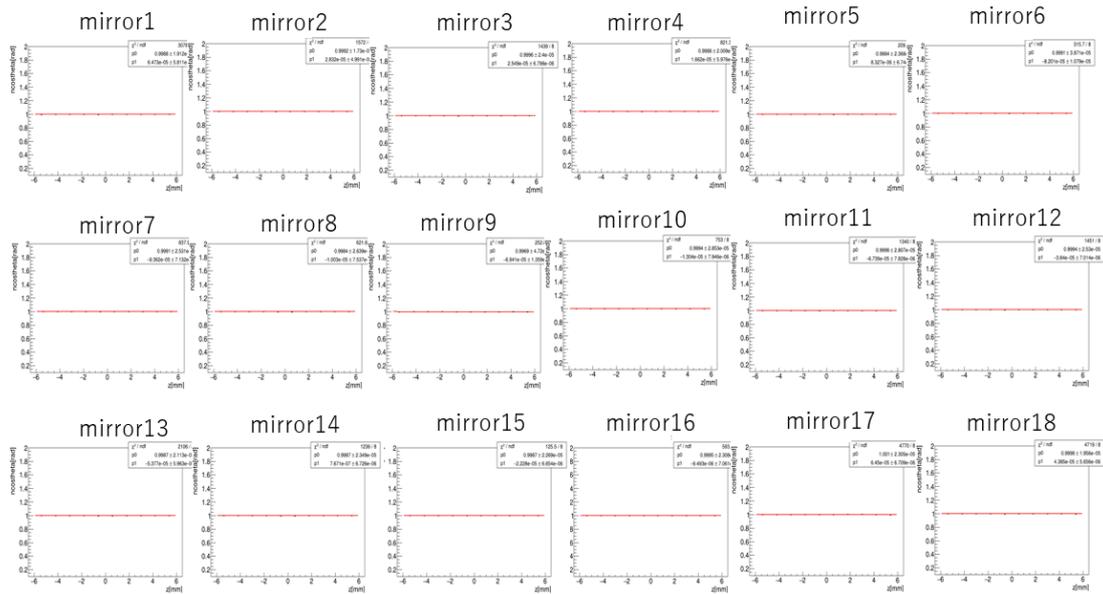


図 5.35 各ミラーを Y 軸へプロジェクションし、フィットした結果のピーク値のグラフ

表 5.18 傾きと誤差

ミラー番号	傾きと誤差	ミラー番号	傾きと誤差
ミラー 1	$(6.47 \pm 0.58) * 10^{-5}$	ミラー 10	$(-1.30 \pm 0.8) * 10^{-5}$
ミラー 2	$(2.83 \pm 0.50) * 10^{-5}$	ミラー 11	$(-6.74 \pm 0.78) * 10^{-5}$
ミラー 3	$(2.55 \pm 0.68) * 10^{-5}$	ミラー 12	$(-3.84 \pm 0.7) * 10^{-5}$
ミラー 4	$(1.66 \pm 0.60) * 10^{-5}$	ミラー 13	$(-5.34 \pm 0.6) * 10^{-5}$
ミラー 5	$(8.33 \pm 6.74) * 10^{-6}$	ミラー 14	$(7.67 \pm 6.73) * 10^{-6}$
ミラー 6	$(-8.2 \pm 0.11) * 10^{-5}$	ミラー 15	$(-2.23 \pm 0.67) * 10^{-5}$
ミラー 7	$(-9.36 \pm 0.71) * 10^{-5}$	ミラー 16	$(-9.49 \pm 7.06) * 10^{-6}$
ミラー 8	$(-1.00 \pm 0.75) * 10^{-5}$	ミラー 17	$(6.45 \pm 0.67) * 10^{-5}$
ミラー 9	$(-6.94 \pm 0.14) * 10^{-5}$	ミラー 18	$(4.39 \pm 0.57) * 10^{-5}$

補正前は傾きが $O(-4)$ であったが、補正後はほとんどのミラーで $O(-5)$ オーダーとなり改善された。

5.2.3 R 方向へのズレの見積もり

R 方向への補正を行うため θ 方向への補正が終わった後、各ミラーについて図 5.36 へ横軸が HAPD へ入射する際の角度の $\cos \theta$ 、縦軸が $n \cos \theta_c$ のヒストグラムを作成した。R 方向へのズレを見積もるため各ヒストグラムの傾きをフィットした結果を表 5.19 へ示す。

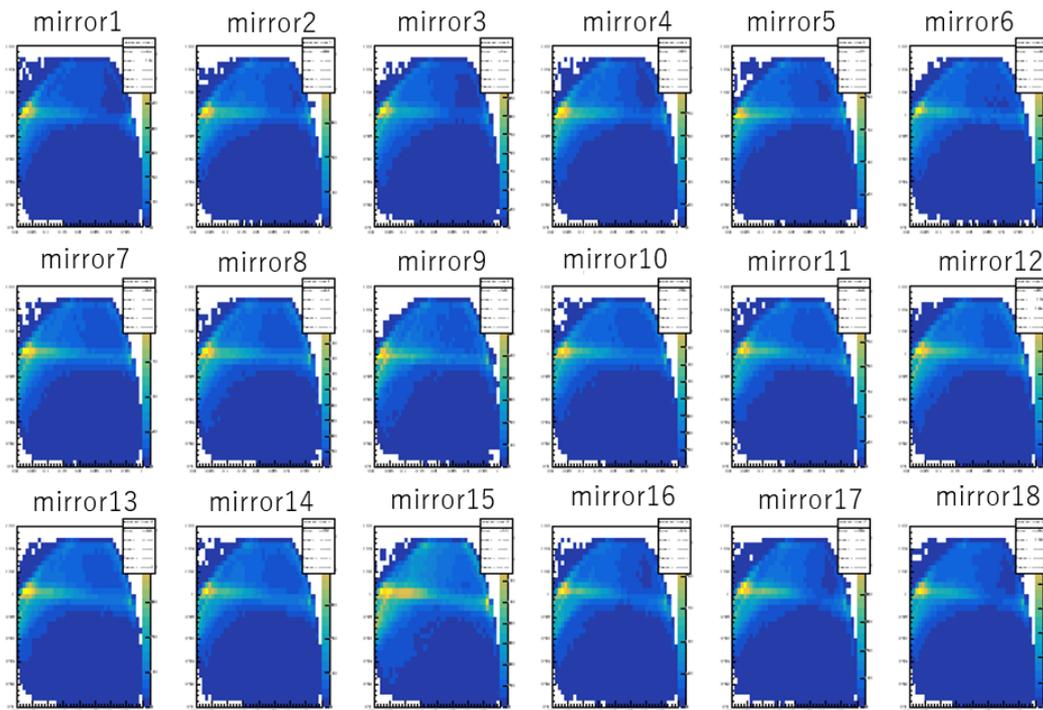


図 5.36 実データでの横軸 $\cos \theta$ の各ミラーにおける $n \cos \theta_c$

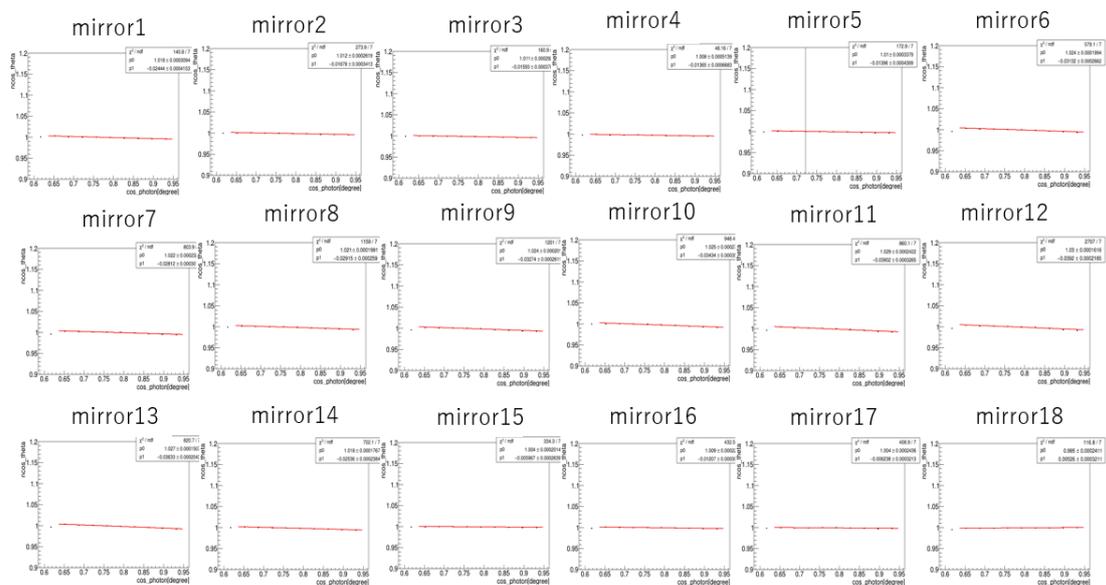


図 5.37 各ミラーを Y 軸へプロジェクションし、フィットした結果のピーク値のグラフ

表 5.19 傾きと誤差

ミラー番号	傾きと誤差	ミラー番号	傾きと誤差
ミラー 1	$(-2.54 \pm 0.02) * 10^{-2}$	ミラー 10	$(-1.4 \pm 0.04) * 10^{-2}$
ミラー 2	$(-5.97 \pm 0.26) * 10^{-3}$	ミラー 11	$(-3.13 \pm 0.03) * 10^{-2}$
ミラー 3	$(-1.21 \pm 0.03) * 10^{-2}$	ミラー 12	$(-2.81 \pm 0.03) * 10^{-2}$
ミラー 4	$(-6.24 \pm 0.32) * 10^{-3}$	ミラー 13	$(-2.92 \pm 0.03) * 10^{-2}$
ミラー 5	$(5.26 \pm 0.32) * 10^{-3}$	ミラー 14	$(-3.27 \pm 0.03) * 10^{-2}$
ミラー 6	$(-2.44 \pm 0.04) * 10^{-2}$	ミラー 15	$(-3.437 \pm 0.04) * 10^{-2}$
ミラー 7	$(-1.68 \pm 0.03) * 10^{-2}$	ミラー 16	$(-3.90 \pm 0.03) * 10^{-2}$
ミラー 8	$(-1.59 \pm 0.04) * 10^{-2}$	ミラー 17	$(-3.92 \pm 0.02) * 10^{-2}$
ミラー 9	$(-1.37 \pm 0.07) * 10^{-2}$	ミラー 18	$(-3.63 \pm 0.02) * 10^{-2}$

フィット結果（表 5.19）とシミュレーション結果表 5.15 から得られたパラメータを用いて予測した R 方向のズレを表 5.20 に示す。

表 5.20 傾きと誤差

ミラー番号	R 方向のズレ (mm)	ミラー番号	R 方向のズレ (mm)
ミラー 1	2.480 ±0.06	ミラー 10	1.545 ±0.10
ミラー 2	0.886 ±0.06	ミラー 11	2.965 ±0.08
ミラー 3	1.389 ±0.08	ミラー 12	2.702 ±0.08
ミラー 4	0.908 ±0.06	ミラー 13	2.784 ±0.06
ミラー 5	-0.035 ±0.08	ミラー 14	3.083 ±0.06
ミラー 6	2.398 ±0.10	ミラー 15	3.211 ±0.09
ミラー 7	1.775 ±0.07	ミラー 16	3.596 ±0.11
ミラー 8	1.700 ±0.09	ミラー 17	3.613 ±0.06
ミラー 9	1.512 ±0.16	ミラー 18	3.37 ±0.04

表 5.20 の値を用いて補正を行い横軸 $\cos \theta$ 、縦軸 $n \cos \theta_c$ の各ミラーごとの結果を以下に示す。

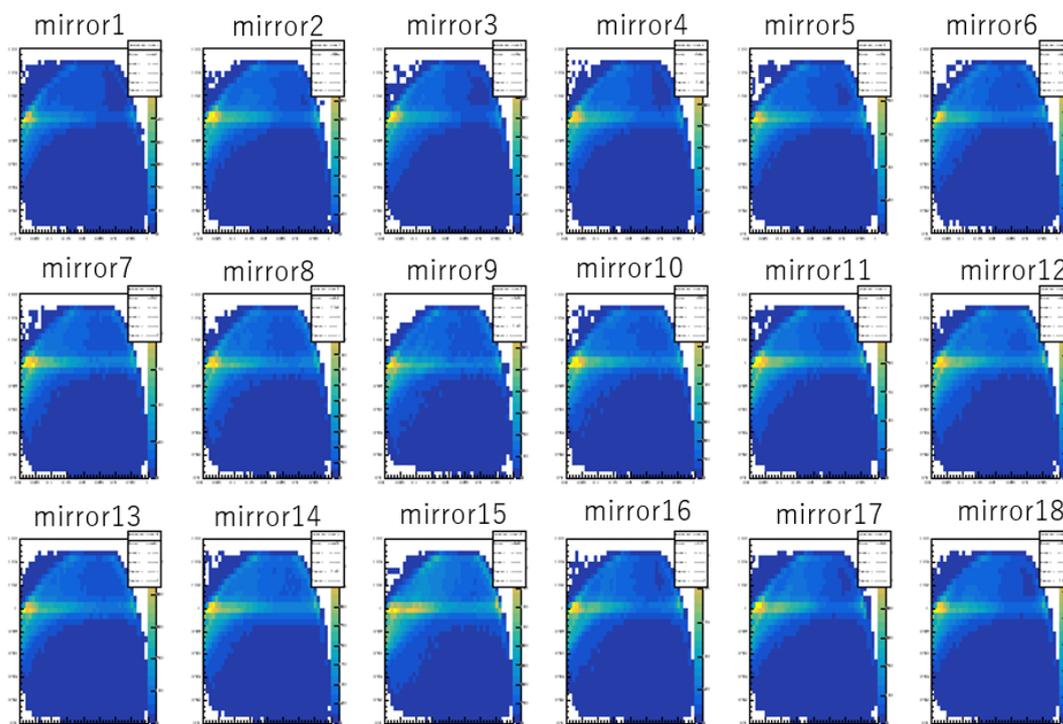


図 5.38 補正後の横軸 $\cos \theta$ の各ミラーにおける $n \cos \theta_c$

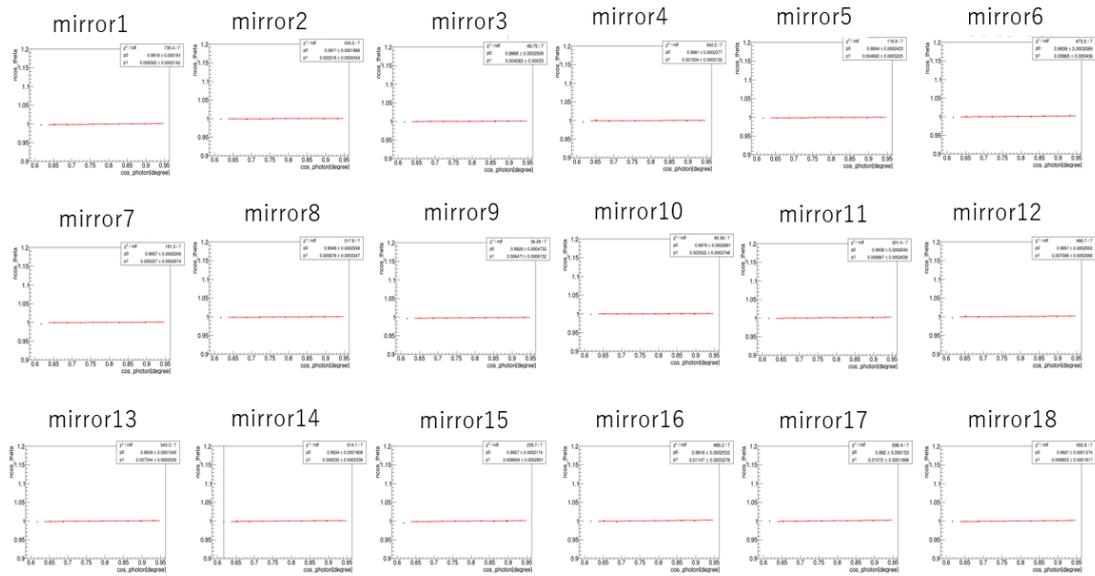


図 5.39 各ミラーを Y 軸へプロジェクションし、フィットした結果のピーク値のグラフ

表 5.21 傾きと誤差

ミラー番号	傾きと誤差	ミラー番号	傾きと誤差
ミラー 1	$(9.39 \pm 0.21) * 10^{-3}$	ミラー 10	$(3.52 \pm 0.38) * 10^{-3}$
ミラー 2	$(3.32 \pm 0.25) * 10^{-3}$	ミラー 11	$(8.87 \pm 0.26) * 10^{-3}$
ミラー 3	$(4.28 \pm 0.33) * 10^{-3}$	ミラー 12	$(-2.81 \pm 0.30) * 10^{-3}$
ミラー 4	$(1.93 \pm 0.31) * 10^{-3}$	ミラー 13	$(7.34 \pm 0.20) * 10^{-3}$
ミラー 5	$(4.69 \pm 0.32) * 10^{-3}$	ミラー 14	$(8.34 \pm 0.23) * 10^{-3}$
ミラー 6	$(8.65 \pm 0.41) * 10^{-3}$	ミラー 15	$(8.69 \pm 0.29) * 10^{-3}$
ミラー 7	$(5.36 \pm 0.30) * 10^{-3}$	ミラー 16	$(1.14 \pm 0.03) * 10^{-2}$
ミラー 8	$(5.68 \pm 0.35) * 10^{-3}$	ミラー 17	$(1.07 \pm 0.02) * 10^{-2}$
ミラー 9	$(6.47 \pm 0.61) * 10^{-3}$	ミラー 18	$(9.85 \pm 0.02) * 10^{-3}$

補正前は傾きが $O(-2)$ であったが、補正後はほとんどのミラーで $O(-3)$ オーダーとなり改善された。

5.2.4 Cherenkov 角度分布

θ 方向、R 方向への補正を行った前後でのヒストグラム分布を比較する。図 5.40 はアライメント前とアライメント後のチェレンコフ角分布を比較したものである。またそのフィット結果 (mean 値と σ) を表 5.22 へ示す。ミラーが正しい位置にある際のシミュレーション結果では mean 値が (0.99993 ± 0.00003) であったためピークの位置が改善されたといえる。また、 σ の値が 4% 減少し改善された。

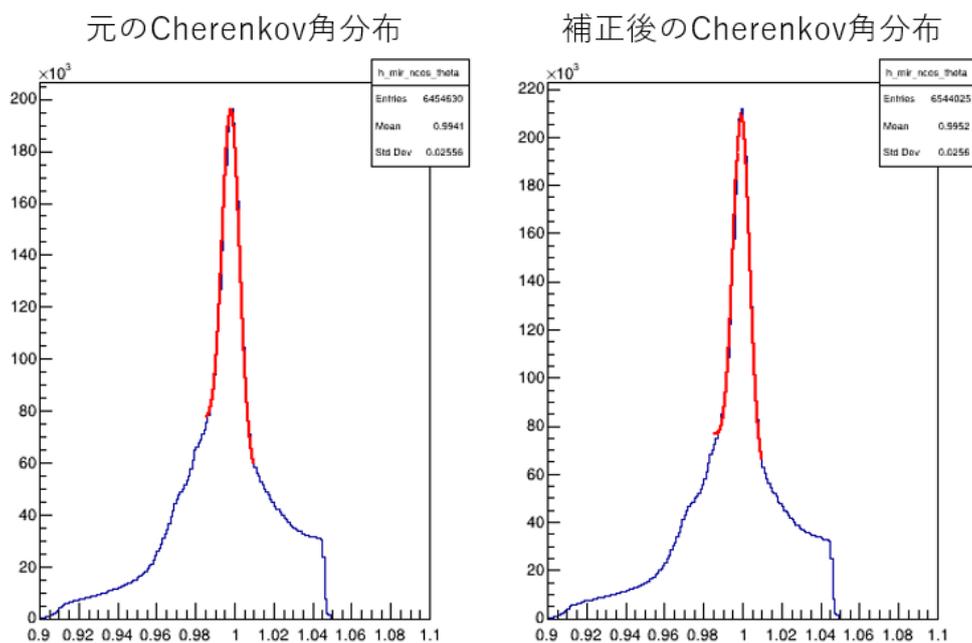


図 5.40 アライメント前後での Cherenkov 角分布

表 5.22 補正前後のピーク値と σ の値

	mean 値	σ
補正前	0.99814 ± 0.0008	$(4.37 \pm 0.01) * 10^{-3}$
補正後	0.99943 ± 0.00007	$(4.18 \pm 0.01) * 10^{-3}$

第 6 章

結論

Belle II 実験は高エネルギー加速器研究機構で行われる SuperKEKB を用いた電子・陽電子非対称エネルギー衝突加速器実験である。Belle II 検出器は各役割に応じた複数の検出器からなる複合型検出器である。その Endcap 部にある ARICH 検出器は荷電 K/π の粒子識別を担っている。ARICH 検出器では荷電粒子が輻射体であるシリカエアロゲルを通過する際に発生するチェレンコフ光を光検出器 HAPD で 2 次元リングイメージとして検出する。粒子識別は光子数に依存しており、識別効率を維持するためには ARICH 検出器の外層を覆っているミラー（反射鏡）が必要不可欠である。

本研究ではモンテカルロシミュレーションを用いてミラーが正しい位置にある場合、ない場合、ARICH の円周方向へ 5mm ずれた場合についての識別効率の比較を行った。その結果ミラーの設置精度によって π 中間子の識別効率が低下し K 中間子の誤識別率が上昇することを確認した。そのためミラーのアライメントが必要であることが分かった。また、ミラーがある場合とない場合では π 中間子の識別効率が約 6% ほど減少し、 K 中間子の誤識別率も 4% ほど上昇した。そのため ARICH の粒子識別にはミラーは有効であることもわかった。

また、ミラーが期待される位置からズレた場合、Cherenkov 角分布にどれほどの影響があるのかをモンテカルロシミュレーションを行うことにより確認した。その結果 R 方向のズレに対しては HAPD への入射角 θ をパラメータとし、 θ 方向の回転にはミラーのヒット位置 z をパラメータとすることで検出できるということがわかった。これを実データに適応したことにより、ミラーにヒットしたと仮定された光子の Cherenkov 角分布のピーク位置を改善し、 σ も 4% 減少させることができた。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々にご指導とご協力をいただきましたことを感謝申し上げます。首都大学東京の角野秀一教授、住吉孝行先生、汲田哲郎助教をはじめ、同研究室の皆様には大変お世話になりました。特に角野秀一教授には本研究を進めるにあたり大変多くの指導をしていただき、いきずまったときには何度も助けていただき深く感謝申し上げます。住吉先生、汲田先生には素粒子実験について様々な知識をご教授いただき、研究に対する助言・添削をしていただいたことを感謝いたします。千葉雅美客員助教、浜津良輔客員准教授にも様々な面でご指導いただき感謝いたします。皆様のご指導・ご支援により、本論文を書き上げることができました。心より感謝申し上げます。

同研究室の先輩であり同じ ARICH グループである米永匡伸さんには本研究についてたくさんの助言をいただきました。感謝いたします。同期の小西達也さん、為近彩智さん、吉川広陽さんとは共に学び、充実した学生生活を送ることができました。特に同じ ARICH グループの為近さんとは研究活動や数々の出張を共にし、より充実した研究生生活を送ることができました。後輩の栗田口さん、久世くん、小林くん、堀くん、在原くん、滝上さん、鶴藤さん、三宅さんには楽しい研究室生活を送らせていただきました。皆様に心より感謝致します。

ARICH グループの共同研究者の方にも多大なるご支援をいただきました。西田昌平准教授、足立一郎准教授には研究面でのアドバイスをいただき、現場での作業やミーティングにおいてご指導していただき深く感謝申し上げます。同グループの金道さん、北村さんには研究を進める上でお世話になりました。

最後になりますが本研究を進めるにあたり精神面、経済面で支えていただいた両親に感謝を申し上げ謝辞とさせていただきます。

参考文献

- [1] A. Abashian et al. [Belle Collaboration], Nucl. Inst. Meth. A 479, 117(2002).
- [2] T. Abe et al. [Belle II Collaboration], [arXiv:1011.0352[physics.ins-det]][Search inSPIRE].
- [3] J.H Christenson, J.W.Cronin, V.L. Fitch and R. Turlay, "Evidence for the 2π Decay of the K_0^2 Meson" , Phys.Rev.Lett.13, pp.138-140(1964)
- [4] M. Kobayashi and T. Maskawa, Progress of Theoretical Physics (1973), 49(2): 652-657
- [5] S. Yamada, et al., IEEE TNS Volume 62, Issue 3, 1175-1180, 2015
- [6] 幡谷航暉 首都大学東京 修士論文 (2016)
- [7] 米永匡伸 首都大学東京 修士論文 (2016)
- [8] 野口宏太 首都大学東京 修士論文 (2017)
- [9] <https://confluence.desy.de/display/BI/ARICH+PlanarMirrors>