

# Belle II 実験における ARICH 検出器のアライメントと粒子識別 性能への影響

東京都立大学大学院 理学研究科  
博士前期課程 2 年 高エネルギー物理実験研究室  
岩城彩希

2022 年 1 月 10 日

指導教員: 角野秀一 教授

## 概要

素粒子標準模型を超える新物理の探索において、高エネルギー加速器実験による仮説の実証や理論の確立が重要である。

Belle II 実験は茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で行われている大規模な国際共同加速器実験である。SuperKEKB 加速器と Belle II 測定器によって構成され、4 GeV 加速させた陽電子ビームと 7 GeV に加速させた電子ビームを衝突させ、衝突により生成される B 中間子やタウレプトンの崩壊を精密に測定することで、素粒子物理学の標準模型を精密に検証するとともに、新しい物理理論の解明を目指している。

Belle II 測定器に搭載されている ARICH (Aerogel Ring Imaging CHerenkov) 検出器は、タイル状に敷き詰められた輻射体シリカエアロゲルと光検出器で構成された粒子識別装置である。荷電粒子がエアロゲルを通過する際に生じるチェレンコフ光を位置検出が可能な光検出器で測定し、再構成した放射角の大きさの違いを利用して主に荷電 K 中間子と荷電  $\pi$  中間子の識別を行なっている。チェレンコフ光の放射角の再構成には、Belle II 測定器に搭載されている内部飛跡検出器から得られる粒子の飛跡情報をもとに推定されるチェレンコフ光の放射点位置、光検出器で検出したチェレンコフ光子の位置が用いられる。そのため、ARICH 検出器と内部飛跡検出器の間の相対的な位置のずれは、ARICH 検出器の粒子識別性能に影響を及ぼすことが懸念される。また、ARICH 検出器の構成要素である光検出器とエアロゲルの相対的な位置のずれも、粒子識別性能に影響を及ぼす可能性がある。

本研究では、 $e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$  事象の実験データとシミュレーションデータを用いて、ARICH 検出器内の光検出器に対するエアロゲルの相対的な位置のずれと、飛跡検出器に対する ARICH 検出器の位置のずれをそれぞれ概算し、ずれが及ぼす粒子識別性能について確認を行なった。

前者では、エアロゲルのずれとしてビーム軸方向への倒れ込みとビーム軸に垂直な平面内での移動について、それぞれ実験データをもとに算出した。また、それらのずれが及ぼす粒子識別性能への影響について、ずれを模擬したシミュレーションデータを用いてチェレンコフ角度分解能を比較し見積もった。その結果、運動量 4 GeV/c での  $K/\pi$  分離能力は、算出されたビーム軸方向への倒れ込みとビーム軸に垂直な平面内での移動に対して、それぞれ約  $0.298\sigma$  および約  $0.025\sigma$  低下することが分かった。

後者では、実験データを用いて ARICH 検出器全体のずれの算出、補正 (アライメント) まで行なった。先行研究から実験データや解析環境を見直し、精密な  $\mu^+\mu^-$  選別条件を課すことで、より高精度なずれの見積もり、およびずれの補正を行った。ずれの見積りの結果、実験データにおいて、6 パラメータのうち最大で x 並進方向約 1.41mm 程度のずれが予想される結果となったが、ずれの補正を行うことで約 0.03mm 程度まで抑えることが可能になった。 $K/\pi$  分離能力は、アライメント適応により運動量 4 GeV/c において  $0.34\sigma$  向上することが分かった。

また、チェレンコフ角度分解能による  $K/\pi$  分離能力の比較に加え、実験データのずれを模擬した  $e^+e^- \rightarrow c\bar{c}$  事象のシミュレーションデータを用いて、アライメント前後の荷電  $K/\pi$  中間子の識別性能の比較を行なった。結果、アライメントの適応により、運動量 3.5 ~ 4 GeV/c においては、誤識別率を 10% と固定したときの  $K$  中間子および  $\pi$  中間子の識別能力がそれぞれ約 1.3% 向上することが分かり、粒子識別性能が有意に改善したことを確認した。

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>序論</b>	<b>7</b>
1.1	素粒子標準模型 . . . . .	7
1.2	CP 対称性の破れ . . . . .	8
1.2.1	CKM 行列 . . . . .	9
1.3	B 中間子の物理 . . . . .	10
1.4	新物理の探索と Belle II 実験の目的 . . . . .	11
<b>第 2 章</b>	<b>Belle II 実験</b>	<b>13</b>
2.1	SuperKEKB 加速器 . . . . .	13
2.2	Belle II 測定器 . . . . .	14
2.2.1	PXD と SVD . . . . .	16
2.2.2	CDC . . . . .	17
2.2.3	TOP . . . . .	17
2.2.4	ARICH . . . . .	18
2.2.5	ECL . . . . .	18
2.2.6	KLM . . . . .	18
2.3	Belle II 実験の現状と今後 . . . . .	18
<b>第 3 章</b>	<b>ARICH 検出器</b>	<b>20</b>
3.1	ARICH 検出器の粒子識別原理 . . . . .	20
3.2	ARICH 検出器の構成要素 . . . . .	23
3.2.1	輻射体シリカエアロゲル . . . . .	23
3.2.2	光検出器 HAPD . . . . .	24
3.3	粒子識別の手法 . . . . .	25
3.4	本研究の目的 . . . . .	26
<b>第 4 章</b>	<b>ARICH 検出器のエアロゲルの位置のずれと粒子識別への影響</b>	<b>28</b>
4.1	概要 . . . . .	28
4.2	平面方向のずれの概算 . . . . .	29
4.2.1	手法 . . . . .	30
4.2.2	使用したデータ . . . . .	30
4.2.3	結果 . . . . .	31
4.3	z 方向のずれの概算 . . . . .	35

4.3.1	手法	35
4.3.2	使用したデータ	36
4.3.3	結果	37
4.4	チェレンコフ角度分解能への影響	39
<b>第 5 章</b>	<b>ARICH 検出器のアライメント</b>	<b>42</b>
5.1	アライメント	43
5.1.1	領域分割	43
5.1.2	ずれを表す 6 パラメータ	44
5.2	アライメントの手順	45
5.2.1	$n \cos \theta_c$ の $\phi_{ch}$ 依存性算出	45
5.2.2	ずれの算出 (フィッティング)	47
5.2.3	ずれの補正	49
5.3	先行研究の課題と改良点	50
5.4	アライメント結果	52
5.4.1	使用したデータ	52
5.4.2	$n \cos \theta_c$ の $\phi_{ch}$ 依存性算出	53
5.4.3	ずれの算出 (フィッティング)	54
5.4.4	ずれの補正	56
5.4.5	アライメントの再現性の確認	57
5.5	チェレンコフ角度分解能への影響	60
<b>第 6 章</b>	<b>ARICH 検出器のずれが及ぼす粒子識別性能への影響</b>	<b>62</b>
6.1	検出効率と誤識別率	62
6.2	粒子識別性能の評価	63
6.2.1	結果	63
<b>第 7 章</b>	<b>結論</b>	<b>69</b>
	謝辞	71
	参考文献	72



# 目次

1.1	素粒子標準模型 [1] . . . . .	8
1.2	ユニタリティ三角形 . . . . .	9
1.3	$(\bar{\rho}, \bar{\eta})$ への実験からの制限 (2021 年春)[4] . . . . .	10
1.4	$B^0$ - $\bar{B}^0$ mixing のファインマンダイアグラム . . . . .	11
1.5	フレーバータギングの模式図 . . . . .	11
2.1	SuperKEKB 加速器の模式図 [3] . . . . .	14
2.2	Belle II 測定器の模式図 [6] . . . . .	15
2.3	Belle II 測定器の内部構造 [9] . . . . .	16
2.4	PXD と SVD[9] . . . . .	17
2.5	2022 年 8 月までの積分ルミノシティの値 [16] . . . . .	19
2.6	ルミノシティの今後の見通し [16] . . . . .	19
3.1	ARICH 検出器 . . . . .	20
3.2	チェレンコフ光の発生原理 . . . . .	21
3.3	ARICH の粒子識別原理 . . . . .	21
3.4	3.5 GeV 付近での $K$ 粒子と $\pi$ 粒子のチェレンコフ角度分布 . . . . .	22
3.5	$K$ 粒子と $\pi$ 粒子のチェレンコフ角度の運動量依存性 . . . . .	22
3.6	ARICH 検出器内部の構成 . . . . .	23
3.7	エアロゲルタイルの大きさ . . . . .	24
3.8	輻射体シリカエアロゲル [2] . . . . .	24
3.9	デュアルレイヤーの模式図 . . . . .	24
3.10	光検出器 HAPD . . . . .	25
3.11	4 章で扱う位置のずれと 5 章で扱う位置のずれの対象の違い . . . . .	27
4.1	使用する座標軸 . . . . .	29
4.2	アルミ枠に嵌め込まれているエアロゲル . . . . .	29
4.3	エアロゲルを $\varphi$ 方向に 1mm 回転させた MC_rotated . . . . .	31
4.4	エアロゲル上での検出光子数 (DATA) . . . . .	31
4.5	エアロゲル上での検出光子数 (MC) . . . . .	31
4.6	エアロゲル上での検出光子数の差 (DATA-MC) . . . . .	32
4.7	エアロゲル上での検出光子数の差 (DATA-MC), $\varphi$ が 0 付近 . . . . .	33
4.8	$\varphi$ 方向の検出光子数の差 (DATA-MC), $62 < r < 78\text{cm}$ かつ $\varphi \simeq 0\text{rad}$ . . . . .	33

4.9	実験データと MC の検出光子数の差とエアロゲルタイル間の隙間の関係 . . . . .	34
4.10	$\varphi$ 方向の検出光子数の差 (MC_rotated1mm-MC), $62 < r < 78\text{cm}$ かつ $\varphi \simeq 0\text{rad}$ . . . . .	34
4.11	エアロゲルを $\varphi$ 方向に 1mm 回転させた MC_rotated と MC の検出光子数の差とエアロゲル タイル間の隙間の関係 . . . . .	34
4.12	z 方向のずれとチェレンコフ角度のずれの関係 . . . . .	35
4.13	エアロゲルを z 方向に 10mm 傾けた MC_tilted . . . . .	36
4.14	チェレンコフ角のエアロゲル上での二次元マップ (DATA) . . . . .	37
4.15	チェレンコフ角のエアロゲル上での二次元マップ (MC) . . . . .	37
4.16	エアロゲル上でのチェレンコフ角の差 (DATA-MC) . . . . .	38
4.17	エアロゲルの外側の縁を 10mm 傾けた MC のチェレンコフ角のエアロゲル上での二次元マップ	39
4.18	エアロゲルの外側の縁を 10mm 傾けた MC と通常の MC のチェレンコフ角の差 $\Delta\theta_c$ のエアロ ゲル上での二次元マップ . . . . .	39
4.19	MC のチェレンコフ角度分布 . . . . .	40
4.20	エアロゲルを xy 平面内で 1mm 回転させた MC のチェレンコフ角度分布 . . . . .	41
4.21	エアロゲルを z 方向に 10mm 傾けた MC のチェレンコフ角度分布 . . . . .	41
5.1	ARICH 検出器が正しい位置にあるときとずれた位置にあるときのチェレンコフ角 . . . . .	42
5.2	アライメントで使用する変数 . . . . .	43
5.3	アライメントで使用する ARICH 検出器の分割領域 . . . . .	44
5.4	36 領域毎の $MC_{\pm param}$ の 6 パラメータのずれ (正方向) の矢印表示. 左上の図から, $x, y$ 並進 方向のずれの大きさは +2mm, z 並進は +5mm, $x, y, z$ 回転方向のずれの大きさは +0.2deg である. . . . .	45
5.5	36 領域中領域 22 における $n \cos \theta_c vs \phi_{ch}$ と $\phi_{ch}$ の 13 分割領域 (緑) . . . . .	46
5.6	$n \cos \theta_c$ のガウス関数と一次関数フィット . . . . .	46
5.7	36 領域中領域 22 における $n \cos \theta_c vs \phi_{ch}$ 依存性 . . . . .	46
5.8	MC のオフセットの矢印表示 . . . . .	47
5.9	ある領域における並進 z 方向のずれを表す直線 . . . . .	48
5.10	ある領域における並進 z 方向のずれを表す直線と実験データの値との差 . . . . .	49
5.11	(先行研究) 実データにおいて 36 領域に分割された ARICH における $n \cos \theta_c vs \phi_{ch}$ 依存性 [14]. 白い箇所が統計がないところである. . . . .	51
5.12	実験データ (exp26, bucket36) のずれの矢印表示 . . . . .	52
5.13	実験データ (exp26, bucket36) の 36 領域の $n \cos \theta_c vs \phi_{ch}$ (13 分割前) . . . . .	53
5.14	実験データ (exp26, bucket36) の 36 領域の $n \cos \theta_c vs \phi_{ch}$ . . . . .	54
5.15	実験データ (exp26, bucket36) の 36 領域の $n \cos \theta_c vs \phi_{ch}$ フィット結果 . . . . .	55
5.16	ずれを補正した実験データ (exp26, bucket36) の 36 領域の $n \cos \theta_c vs \phi_{ch}$ フィット結果 . . . . .	56
5.17	実験データのずれを模擬した MC の 36 領域の $n \cos \theta_c vs \phi_{ch}$ フィット結果 . . . . .	57
5.18	実験データのずれを補正した MC の 36 領域の $n \cos \theta_c vs \phi_{ch}$ フィット結果 . . . . .	59
5.19	実験データのずれを補正した MC の 36 領域の $n \cos \theta_c vs \phi_{ch}$ フィット結果 (MC のオフセッ トを差し引いたもの) . . . . .	60
5.20	アライメント前の実験データのチェレンコフ角度分布 . . . . .	61

5.21	アライメント後の実験データのチェレンコフ角度分布 . . . . .	61
6.1	アライメント前後の MC の $K_{eff}$ vs $p$ ( $R_{K/\pi} > 0.6$ ) . . . . .	64
6.2	アライメント前後の MC の $\pi_{fake}$ vs $p$ ( $R_{K/\pi} > 0.6$ ) . . . . .	64
6.3	アライメント前後の MC の $\pi_{eff}$ vs $p$ ( $R_{\pi/K} > 0.1$ ) . . . . .	64
6.4	アライメント前後の MC の $K_{fake}$ vs $p$ ( $R_{\pi/K} > 0.1$ ) . . . . .	64
6.5	通常の MC とアライメント後の MC の $K_{eff}$ vs $p$ ( $R_{K/\pi} > 0.6$ ) . . . . .	65
6.6	通常の MC とアライメント後の MC の $\pi_{fake}$ vs $p$ ( $R_{K/\pi} > 0.6$ ) . . . . .	65
6.7	通常の MC とアライメント後の MC の $\pi_{eff}$ vs $p$ ( $R_{\pi/K} > 0.1$ ) . . . . .	65
6.8	通常の MC とアライメント後の MC の $K_{fake}$ vs $p$ ( $R_{\pi/K} > 0.1$ ) . . . . .	65
6.9	通常の MC とアライメント前後の MC の $K_{eff}$ vs $p$ ( $\pi_{fake} \simeq 0.1$ ) . . . . .	66
6.10	通常の MC とアライメント前後の MC の $\pi_{eff}$ vs $p$ ( $K_{fake} \simeq 0.1$ ) . . . . .	66

# 表目次

5.1	実験データ (exp26,bucket36) の 36 領域の $n \cos \theta_c vs \phi_{ch}$ フィット結果の値 . . . . .	55
5.2	ずれを補正した実験データ (exp26,bucket36) の 36 領域の $n \cos \theta_c vs \phi_{ch}$ フィット結果の値 . .	56
5.3	ずらした 6 パラメータの値 (= 表 5.1 のフィット結果の値) . . . . .	58
5.4	実験データのずれを模擬した MC の 36 領域の $n \cos \theta_c vs \phi_{ch}$ フィット結果の値 . . . . .	58
5.5	実験データのずれを補正した MC の 36 領域の $n \cos \theta_c vs \phi_{ch}$ フィット結果の値 . . . . .	59
6.1	運動量別の $\pi_{eff}$ の値 ( $K_{fake} \simeq 0.1$ ) . . . . .	67
6.2	運動量別の $K_{eff}$ の値 ( $\pi_{fake} \simeq 0.1$ ) . . . . .	67

# 第 1 章

## 序論

素粒子は物質を構成する最小単位であり、あらゆる物理現象ごとの根本を辿れば、すべて素粒子や素粒子がもつ性質が起因しているとわかる。しかし、現在解明されている素粒子では説明できない現象も少なくない。

素粒子物理学は、素粒子の性質について解き明かす学問であり、なかでも高エネルギー加速器を用いた実験は、さまざまな仮説を実証し、素粒子の理論を確立するのに欠かせない実験である。この章では、素粒子の枠組みである標準模型や、高エネルギー加速器実験の中でも本研究に関わる Belle II 実験が目指す新物理について述べる。

### 1.1 素粒子標準模型

素粒子標準模型とは、現在までに確立されている素粒子の分類や性質についてまとめた枠組みのことである。標準模型の理論は相対論的場の量子論に基づいており、現在までに行われてきた素粒子実験の結果のほとんどを再現することができる。

標準模型を構成する粒子や力について図 1.1 に記す。

あらゆる物質は、フェルミオンと呼ばれる 12 種類の粒子から構成される。フェルミオンはさらに、相互作用や電荷の違いから、クォークとレプトンという 2 種類に分類される。また、クォークやレプトンは世代を持ち、世代間の混合が許されている。

一方、ボソンに分類される粒子は、さらにゲージボソンとスカラーボソンに分けられる。ゲージボソンと呼ばれる粒子は、物質間の力を媒介する粒子である。電磁気力、強い力、弱い力、重力の 4 つの力のうち、重力を除く 3 つの力に対してそれぞれ力を媒介するゲージボソンが存在する。スカラーボソンと呼ばれる粒子は、物質に質量を与える粒子であり、中性ヒッグス粒子のみとされている。

2012 年に CERN(欧州原子核研究機構) の LHC 実験によってヒッグス粒子が発見されたことにより、標準模型で予言されていた粒子は全て観測された。しかし、標準模型では説明しきれない現象や物質が依然としてあることから、標準模型を超える理論である新物理があるとされている。

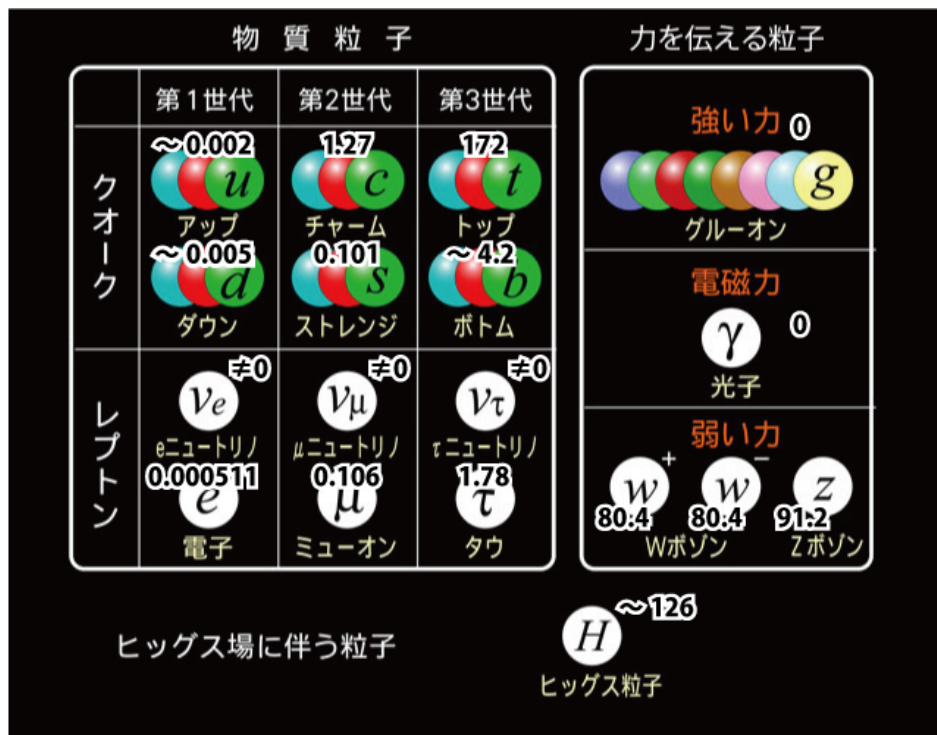


図 1.1: 素粒子標準模型 [1]

## 1.2 CP 対称性の破れ

CP 対称性の破れの解明は、宇宙の物質反物質非対称性等の謎の解明につながるとして、高エネルギー実験分野でも精力的に研究されている現象のうちのひとつである。

CP 対称性とは、CP 変換に対して物理法則が不変であることである。粒子を反粒子に置き換える、つまり電荷を反転させる荷電共役変換 (C 変換) と、空間の鏡映反転を行うパリティ変換 (P 変換) を組み合わせて同時に作用させることを CP 変換という。

初めて CP 対称性の破れが実験的に観測されたのは、1964 年のことである。J.W.Cronin と V.L.Fitch によって、中性 K 中間子の崩壊  $K_L^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$  の観測により CP 対称性の破れが発見された。この発見により、J.W.Cronin と V.L.Fitch は 1980 年にノーベル物理学賞を受賞した。

1973 年には、小林・益川理論により、当時 3 種類しか知られていなかったクォークに対して 3 世代以上のクォークを導入することで、CP 対称性の破れの説明が可能であることが示された。小林・益川理論では、以下で説明するように、ガビボ・小林・益川行列 (CKM 行列) によるクォークの混合が唱えられた。

## 1.2.1 CKM 行列

ガビボ・小林・益川行列 (CKM 行列) は、 $3 \times 3$  の複素ユニタリー行列である。CKM 行列  $V_{CKM}$  は、クォークの質量固有状態を弱い相互作用の固有状態の混合を表し、式 1.1 のように書ける。

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

この行列の一般系は 3 つの回転角と 1 つの複素位相で書き表すことができ、そのうちの複素位相以外のパラメータは直接的に観測が可能である。CKM 行列は例として、式 1.2 のように書き表すことができる。

$$\begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

ここで、 $s_{ij} = \sin\theta_{ij}$ ,  $c_{ij} = \cos\theta_{ij}$  であり、 $\delta$  は CP 対称性の破れの元となる CP 複素位相である。また、上記の式 1.2 を別の表現で書き換えたものが、Wolfenstein 表記の CKM 行列である。(式 1.3)

$$\begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{\lambda^2}{2} & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \frac{\lambda^2}{2} & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + o(\lambda^4) \quad (1.3)$$

これは、式 1.2 に対して  $s_{12} = \lambda$ ,  $s_{23} = A\lambda^2$ ,  $s_{13}e^{i\delta} = A\lambda^3(\rho + i\eta)$  と置き換えたものと同じである。ここで、ユニタリー性の関係式

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

を用いることで、 $\bar{\rho} - \bar{\eta}$  の複素平面上において以下の図 1.2 のようなユニタリティ三角形と呼ばれる三角形で表現することができる。ユニタリティ三角形の角度  $\phi_1, \phi_2, \phi_3$  や辺をさまざまな実験から決定し、CP 対称性の破れの精密測定や新物理の兆候の探索を行なっている。最新のユニタリティ三角形の結果を図 1.3 に示す。

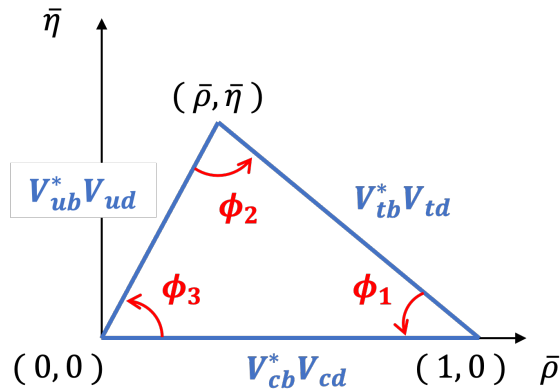


図 1.2: ユニタリティ三角形

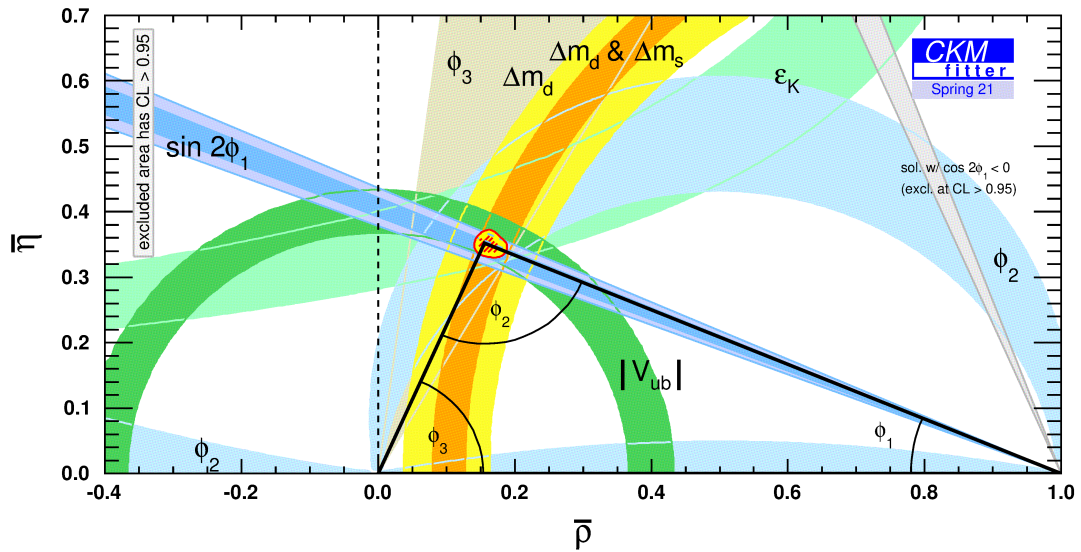


図 1.3:  $(\bar{\rho}, \bar{\eta})$  への実験からの制限 (2021 年春)[4]

### 1.3 B 中間子の物理

Belle II 実験のような非対称エネルギーの電子陽電子衝突型加速器実験では、電子と陽電子の衝突エネルギーを  $10.58\text{GeV}$  と、 $\Upsilon(4S)$  の質量に合わせて設計されている。 $\Upsilon(4S)$  は  $b\bar{b}$  のスピン 1 の共鳴状態であり、B 中間子対に崩壊できる最低エネルギーの共鳴状態である。 $\Upsilon(4S)$  のほぼ全てが  $B^0\bar{B}^0$  もしくは  $B^+B^-$  に崩壊するため、結果的に大量の B 中間子の生成が可能となる。このように大量の B 中間子を生成する実験のことを B ファクトリー実験と呼ぶ。

B 中間子は、b クォークと、軽いクォークやグルーオンが束縛状態にある粒子である。寿命が  $1.5\text{ps}$  と長寿命であるため崩壊点の検出により寿命の測定および混合と崩壊による CP 対称性の破れの測定が可能であり、稀崩壊が標準模型において抑制されているため、加速器実験における新物理探索に適した粒子である。また、測定可能な CP 非対称度も K 中間子よりも高いことが知られている。

$B^0\bar{B}^0$  は図 1.4 のように  $B^0-\bar{B}^0$  mixing という遷移を起こす。



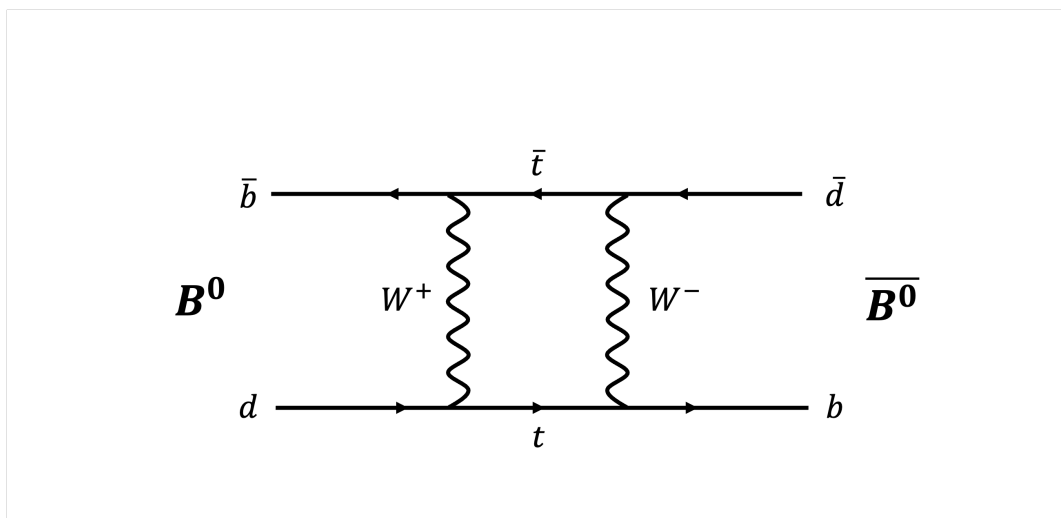


図 1.4:  $B^0$ - $\bar{B}^0$ mixing のファインマンダイアグラム

CP 対称性の観測には、 $B^0$  $\bar{B}^0$  がそれぞれ崩壊を起こす時間差の測定が重要である。Belle II 実験では、図 1.5 のように  $B^0$  $\bar{B}^0$  をシグナルサイドとタグサイドに分けて、タグサイドで測定した終状態から  $B^0$  もしくは  $\bar{B}^0$  を再構成し、シグナルサイドの  $\bar{B}^0$  もしくは  $B^0$  を同定している。このことをフレーバータギングと呼ぶ。フレーバータギングした情報や再構成した崩壊点時間差をもとに、CP 非対称度の算出を行っている。

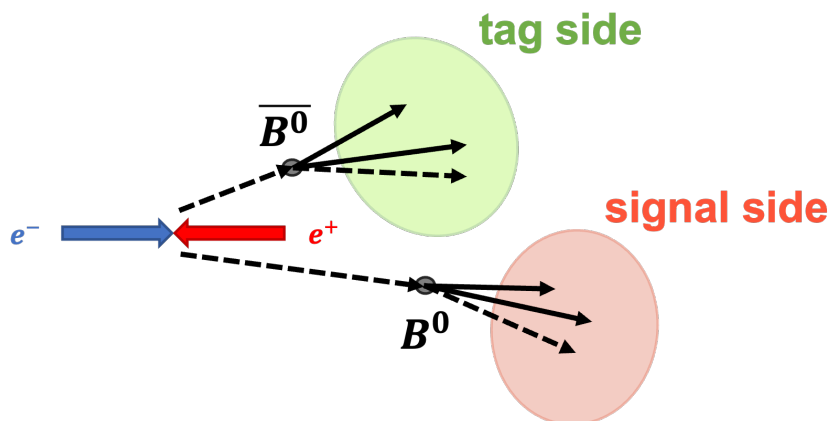


図 1.5: フレーバータギングの模式図

## 1.4 新物理の探索と Belle II 実験の目的

上記で述べた CP 対称性の破れの他にも、物質反物質非対称性の謎やダークマターなど、現在の標準模型では説明が難しいことが多々ある。そして新物理の探索には、高いエネルギースケールでの加速器実験における仮説の実証が重要である。

Belle II 実験の前身の実験である Belle 実験では、2008 年に小林誠博士と益川敏英博士が 3 世代のクォー

ク混合による CP 対称性の破れの理論によりノーベル賞を受賞している。Belle II 実験ではさらに、加速器や検出器、ソフトウェアのアップグレードを行うことにより、Belle 実験よりも高精度なユニタリティ三角形の測定と、大量のデータを用いたハドロンやダークセクター等の広い領域での新物理探索を行なっている。

## 第 2 章

# Belle II 実験

Belle II 実験は、世界中の 1,100 人以上の研究者が参加する国際共同加速器実験である。4 GeV に加速させた陽電子と 7 GeV に加速させた電子の衝突により生成する B 中間子等の崩壊粒子を精密に測定することで、標準模型を超える新物理の発見を目指している。

実験設備は茨城県のつくば市の KEK（高エネルギー加速器研究機構）の地下約 11 m の地下トンネルにあり、粒子を加速させる SuperKEKB 加速器と、粒子の衝突反応を測定する Belle II 測定器の大きく 2 つに分けられる。この章では、SuperKEKB 加速器と Belle II 測定器それぞれ詳細について述べた後、Belle II 実験の現状や今後について述べる。

### 2.1 SuperKEKB 加速器

SuperKEKB 加速器 (図 2.1) は、非対称エネルギーの電子陽電子衝突型加速器で、大量の B 中間子が生成が可能であることが特徴である。電子と陽電子は、周長約 3 km のリングでそれぞれ 7 GeV と 4 GeV で加速され、衝突される。衝突ビームの重心系エネルギーは 10.58 GeV であり、B 中間子生成に適するように設計されている。

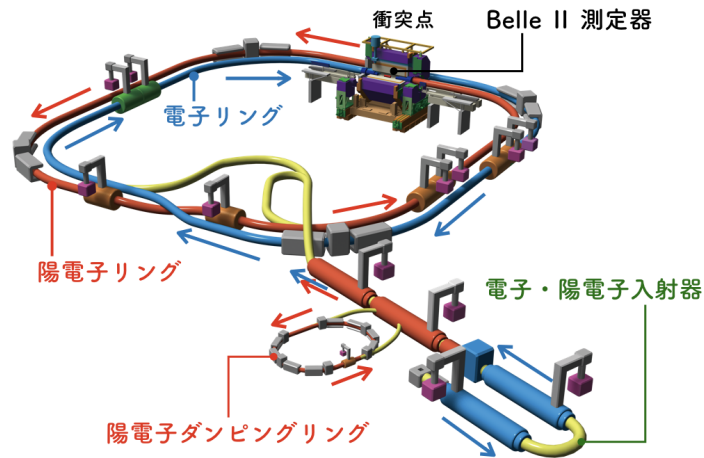


図 2.1: SuperKEKB 加速器の模式図 [3]

また、2022 年 6 月には瞬間ルミノシティが世界最高記録である  $4.7 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  を達成し、世界最高のルミノシティ性能を持つ加速器となった。[7] ルミノシティは加速器の性能の指標として用いられることが多く、下記の式で表される。

$$Y = L \times \sigma \quad (2.1)$$

$L[\text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}]$  がルミノシティ、 $\sigma[\text{cm}^2]$  が粒子の生成断面積 (cross section)、 $Y[\text{sec}^{-1}]$  が粒子の単位時間あたりの生成数である。ルミノシティが高いほど多くのデータを扱うことができるため、Belle II 実験は高いルミノシティで大量のデータを集め、稀な崩壊反応を間接的に測定するルミノシティフロンティアと呼ばれる領域の実験として位置づけられる。

前身の実験である Belle 実験で用いられていた KEKB 加速器も、2009 年に当時は世界最高であった瞬間ルミノシティ  $2.1 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  を達成していた。KEKB 加速器をさらに蓄積ビーム電流を約 2 倍に、ビームサイズを 1/20 に絞ることで、40 倍のルミノシティを得られるようにアップグレードさせたものが SuperKEKB 加速器である。ビーム電流を増強するため、ビームパイプの交換や陽電子ダンピングリングの新設など、さまざまな装置の改良を行った。また、SuperKEKB 加速器では世界で初めてナノビーム方式と呼ばれるビーム衝突方式を取り入れた。ナノビーム方式では、ナノメートルサイズのビームを大きな交差角角度で衝突させることで、ビーム同士の重なる領域を減らし、ビームサイズを細長く絞ることでルミノシティを上げることが可能となる。

## 2.2 Belle II 測定器

Belle II 測定器は、6 つの検出器からなる複合検出器で、各検出器の情報を組み合わせて物理解析に必要な情報を取得している。Belle II 測定器全体の模式図と内部の構造について図 2.2、2.3 に示す。

次に、各検出器の役割や構成、有効検出角 (ビーム軸からの極角)、前身の Belle 実験との比較について述べる。

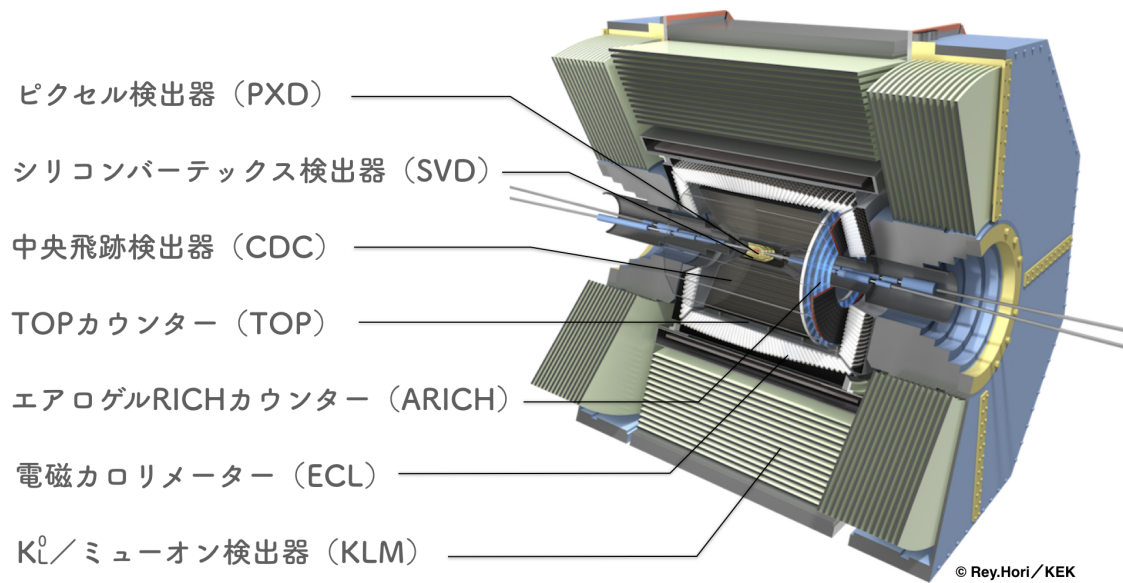


図 2.2: Belle II 測定器の模式図 [6]

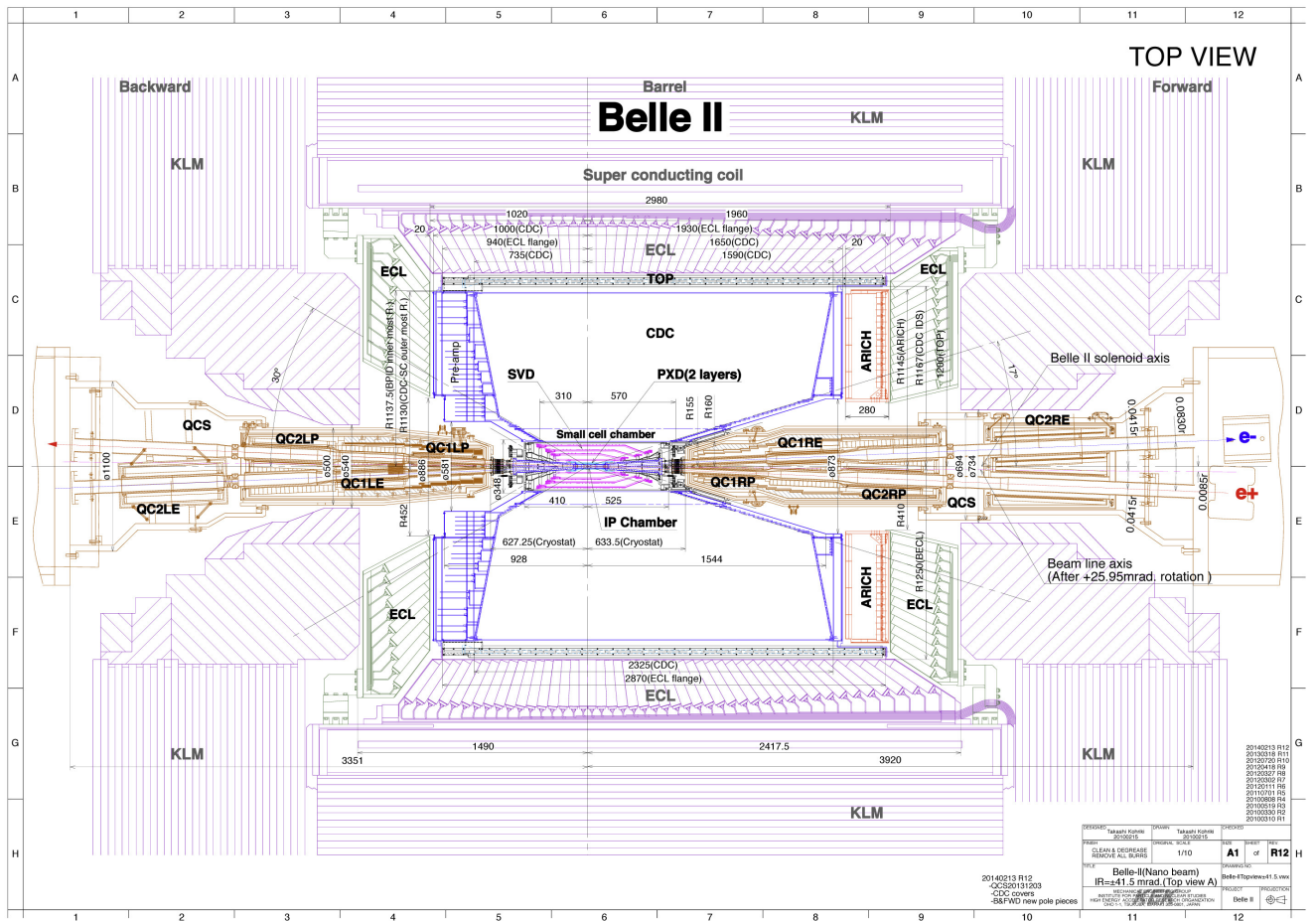


図 2.3: Belle II 測定器の内部構造 [9]

## 2.2.1 PXD と SVD

Belle II 実験で用いられている崩壊点検出器 (図 2.4) は、2つの検出器を組み合わせた計6層から成る。内側の2層がPXD(PiXel Detector)、外側の4層がSVD(Silicon Vertex Detector)である。最内層が約14mm、最外層が約140mmほどの大きさで、有効検出角は17度～150度である。

PXDとSVDという2つの検出器を組み合わせることで、バックグラウンドヒットや放射線に耐性持ち、 $20\mu\text{m}$ の崩壊点位置分解能で高精度な崩壊点の再構成を可能にしている。

PXDは、半導体検出器であるDEPFET(DEPleted Field Effect Transistor)ピクセルセンサーが、1層目に8個、2層目に12個取り付けられている。DEPFETピクセルセンサーの厚さは $50\mu\text{m}$ と非常に薄く、高い位置分解能を持つことが特徴である。

SVDは、半導体検出器であるDSSD(Double-sided Silicon Strip Detector)センサーが4層に、計187個取り付けられている。DSSDセンサーは両面型シリコンストリップセンサーである。PXD外部で崩壊する粒子の崩壊点再構成や、PXDのバックグラウンドヒット除去など、様々な役割を担っている。

Belle 実験で用いられていた崩壊点検出器よりも内径を小さく、外径を大きくすることでバックグラウンド

が減少し、崩壊点の位置分解能が向上した。

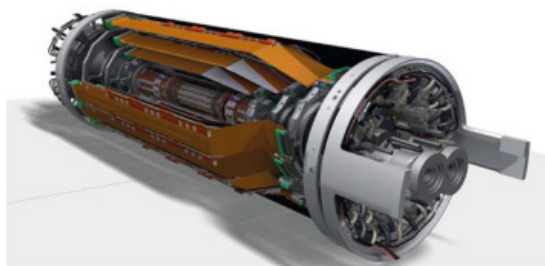


図 2.4: PXD と SVD[9]

## 2.2.2 CDC

CDC(Central Drift Cenber) は PXD と SVD を覆うように Belle II 検出器の中央に設置されている、飛跡検出器である。CDC の役割は、荷電粒子の飛跡 (トラック) や運動量の測定のほかに、エネルギー損失による粒子識別、荷電粒子に対するトリガーなどがある。他の粒子識別検出器で識別できない低運動量領域の荷電粒子に関しては、CDC の情報で粒子識別をおこなっている。

CDC の構造は図のように内半径が約 160 mm、外半径が約 1130 mm、長さ約 2600 mm の円筒状の形状をしている。内部には信号観測用のセンスワイヤー 14,336 本と、電場生成のためのフィールドワイヤー 42,240 本の計 56,576 本がビーム軸方向に張り巡らされており、He と  $C_2H_6$  のガスで満たされている。

CDC の原理は、チェンバー内を通過した荷電粒子によってガス分子が電離し、ガス増幅を起こすことによってセンスワイヤーに誘導電流が生じる。この 2 次元の飛跡信号を読み出し、z 方向の位置情報と合わせることで、3 次元の飛跡を再構成している。また、約 1.5T の磁場によって曲がる飛跡の曲率から運動量を、荷電粒子が曲がった向きから電荷の正負を測定することができる。さらに、信号の大きさから、粒子識別に必要なエネルギー損失を得ることができる。

Belle 実験で用いられていたものよりも大型化し、CDC 内部の単位面積あたりのワイヤーの密度を変えることで、位置情報や運動量の分解能が向上した。

## 2.2.3 TOP

TOP(Time Of Propagation) 検出器は、Belle II 測定器のバレル部に設置されている、粒子識別装置である。有効検出角は 31 度~128 度である。TOP の主な役割は、後述の ARICH 検出器と同様に、荷電  $\pi$  中間子と荷電  $K$  中間子の識別である。

TOP は、輻射体である 2 層の石英ガラスと光検出器 MCPMT で構成されており、厚さ 20 mm と小型の検出器である。測定原理は、荷電粒子が TOP 内部の石英ガラスを通過した際に放出されるチェレンコフ光が光検出器に到着する時間と位置から粒子の識別を行なっている。チェレンコフ光の原理については 3.1 節で述べる。

TOP は Belle 実験では搭載されておらず、粒子識別精度向上の目的で Belle II 実験で新しく搭載された検出器である。

## 2.2.4 ARICH

ARICH(Aerogel Ring Imaging CHerenkov) 検出器は、Belle II 測定器のエンドキャップ部に設置されている、粒子識別装置である。有効検出角は 15 度~34 度である。

詳細は 3 章で述べる。

## 2.2.5 ECL

ECL(Electromagnetic CaLorimeter) は、バレル部とエンドキャップ部に設置されている電磁カロリメーターで、光子や電子、陽電子のエネルギーを測定している。また、ECL の情報は、トリガー信号の生成や粒子識別に用いられる。

ECL は、バレル部に 6624 個の純 CsI(Tl) 結晶と、エンドキャップ部に 2112 個の CsI 結晶を用いており、合計 8736 個の結晶と、光検出器で構成されている。測定原理は、電子や光子などが結晶中で生じる電磁シャワーによるシンチレーション光を測定することでエネルギーの測定を行なっている。

Belle 実験で用いられていた電磁カロリメーター読み出し回路から改良を行ったことにより、ノイズが大幅に削減された。

## 2.2.6 KLM

KLM(K-Long Muon detector) は、Belle II 測定器の最外部に設置されている長寿命粒子識別装置で、名前の通り、主に  $K_L^0$  中間子と  $\mu$  粒子の同定を担っている。 $K_L^0$  中間子と  $\mu$  粒子も物質との相互反応を起こしにくい物質である。

KLM は、ストリップ状のプラスチックシンチレーターと光検出器 MPPC で構成された検出器の層と鉄板の層のサンドウィッチ構造となっている。ハドロンである  $K_L^0$  中間子は ECL や鉄板で強い相互作用によってハドロンシャワーを起こし、検出が可能となる。 $\mu$  粒子は物質中で電磁相互作用による電離損失でエネルギーを失いながらも直進するため、CDC によって外挿された飛跡の情報と照らし合わせることで  $\mu$  粒子の同定を行なっている。また、同様に、質量がよく似ているが強い相互作用を起こす  $\pi$  中間子と  $\mu$  粒子の識別も可能にしている。

Belle 実験で用いられていたものを改良し、ガラス電極の抵抗板チェンバー (RPCs) をプラスチックシンチレーターストリップの層に置き換えることで、ノイズが削減された。

## 2.3 Belle II 実験の現状と今後

Belle II 実験は Phase I、Phase II、Phase III の 3 つの段階に分けて行われる。

ビーム衝突を伴わない実験の準備段階にあたる Phase I は 2016 年から始まり、加速器や測定器の調整が行われた。

Phase II は 2018 年春から始まり、初めてビーム衝突が行われた。データ収集や物理解析も始まり、測定器の改良やビームサイズを絞りながらルミノシティ向上を目指した。

そして 2019 年から Phase III の段階に入り、Belle II 実験の本格稼働が開始した。

今後 10 年以上の稼働を見越しており、最終的な積分ルミノシティの目標値は Belle 実験の 40 倍の  $50\text{fb}^{-1}$



である。現在までの積分ルミノシティの値を図 2.5 に、今後の目標値について図 2.6 に示す。

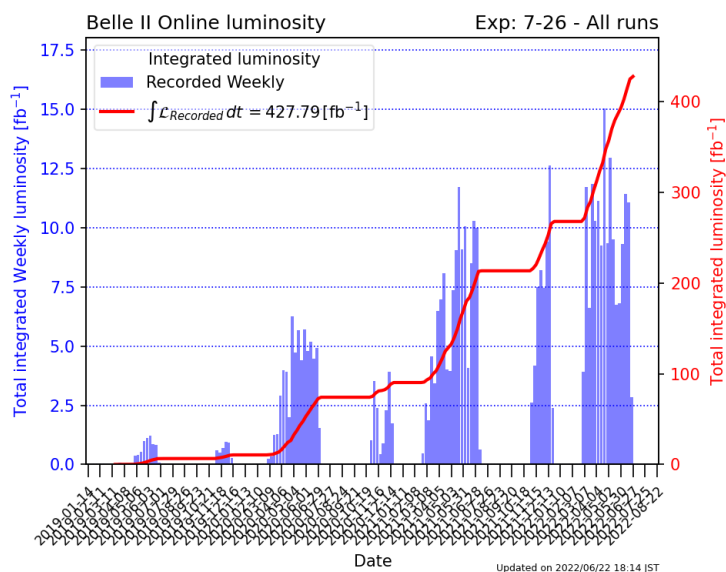


図 2.5: 2022 年 8 月までの積分ルミノシティの値 [16]

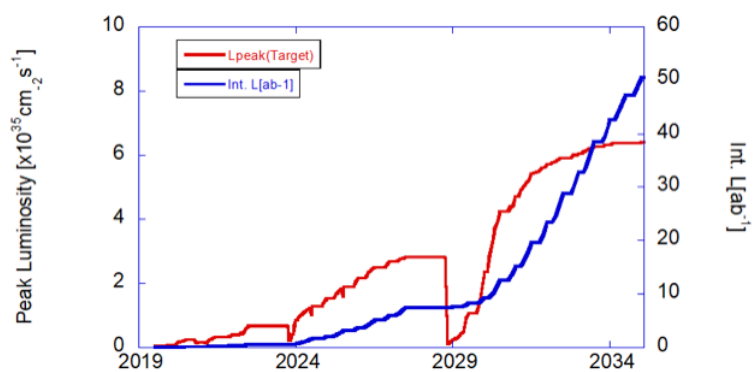


図 2.6: ルミノシティの今後の見通し [16]

また、2022 年夏頃からロングシャットダウン (LS1) という一時停止期間に入り、運転の再開は 2023 年秋頃を予定している。この LS1 では VXD の入れ替えや測定器のメンテナンス、改良が行われる。LS1 の次のロングシャットダウン (LS2) は 2026 年から 2027 年を予定している。

## 第 3 章

# ARICH 検出器

ARICH 検出器 (図 3.1) は、Belle II 測定器の中でもエンドキャップ部に設置されている粒子識別装置である。ARICH 検出器では、約 0.5 ~ 4.0GeV の領域で、 $K$  粒子、 $\pi$  粒子、陽子の識別が可能である。中でも、 $K$  粒子と  $\pi$  粒子の識別は、 $B$  中間子の稀崩壊を観測する上で重要である。

この章では、ARICH 検出器の粒子識別原理や構成について述べる。

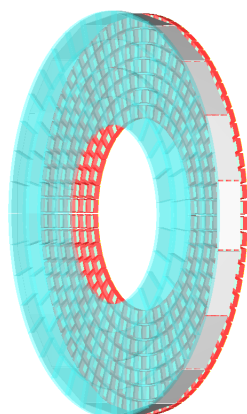


図 3.1: ARICH 検出器

### 3.1 ARICH 検出器の粒子識別原理

ARICH 検出器は、荷電粒子が輻射体シリカエアロゲルを通過するときに発生するチェレンコフ光を利用して粒子識別を行なっている。チェレンコフ光は、荷電粒子が屈折率  $n$  の媒質を通過する際に、荷電粒子の速度がその媒質中の光速を超えたときに増幅される電磁場の波の干渉によって放出される光のことである。図 3.2 にチェレンコフ光の発生原理の図を示す。

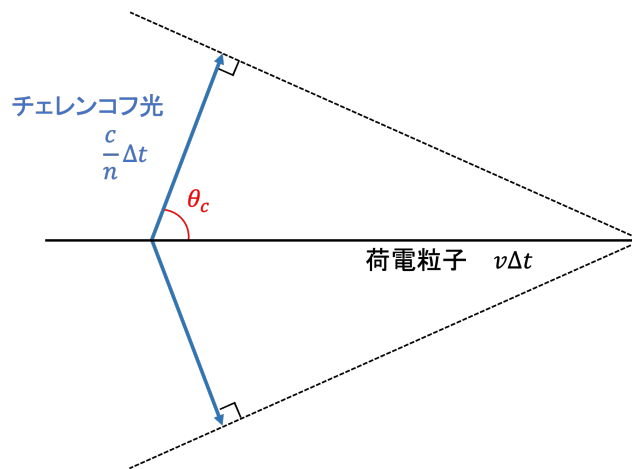


図 3.2: チェレンコフ光の発生原理

荷電粒子の運動方向に対してチェレンコフ光が放出される放射角度（チェレンコフ角） $\theta_c$  は、以下の式で表すことができる。

$$\cos \theta = \frac{1}{\beta n} = \frac{\sqrt{(m/p)^2 + 1}}{n} \quad (3.1)$$

$m$ 、 $p$  はそれぞれ荷電粒子の質量と運動量、 $n$  は粒子が通過する媒質の屈折率である。ARICH 検出器に入射する荷電粒子は、飛跡検出器 CDC によって運動量  $p$  が測定されたトラックが外挿されるため、運動量  $p$  は既知の値であり、輻射体シリカエアロゲルの屈折率  $n$  は物質固有の値で既知である。つまりこの式から分かるように、ARICH 検出器ではチェレンコフ角を求めることで荷電粒子の質量を見積もることができ、質量の異なる粒子の識別を可能にしている。

図 3.3 に、ARICH 検出器の粒子識別の概念図を示す。

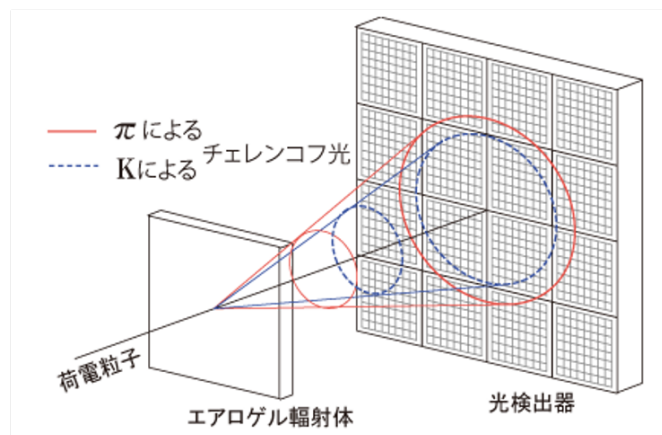


図 3.3: ARICH の粒子識別原理

荷電粒子がシリカエアロゲルを通過する際に円錐上に放射するチェレンコフ光子を光検出器で二次元のリングイメージとして検出し、検出した光子（検出光子）の位置やトラックの情報からチェレンコフ角を再構成し

ている。同じ運動量領域での  $K$  粒子と  $\pi$  粒子のチェレンコフ角の違いを図 3.4 に示す。例として 3.5GeV 付近において、 $K$  粒子と  $\pi$  粒子のチェレンコフ角の差は約 30mrad に及ぶ。

また、 $K$  粒子と  $\pi$  粒子のチェレンコフ角度の運動量依存性について図 3.5 に示す。

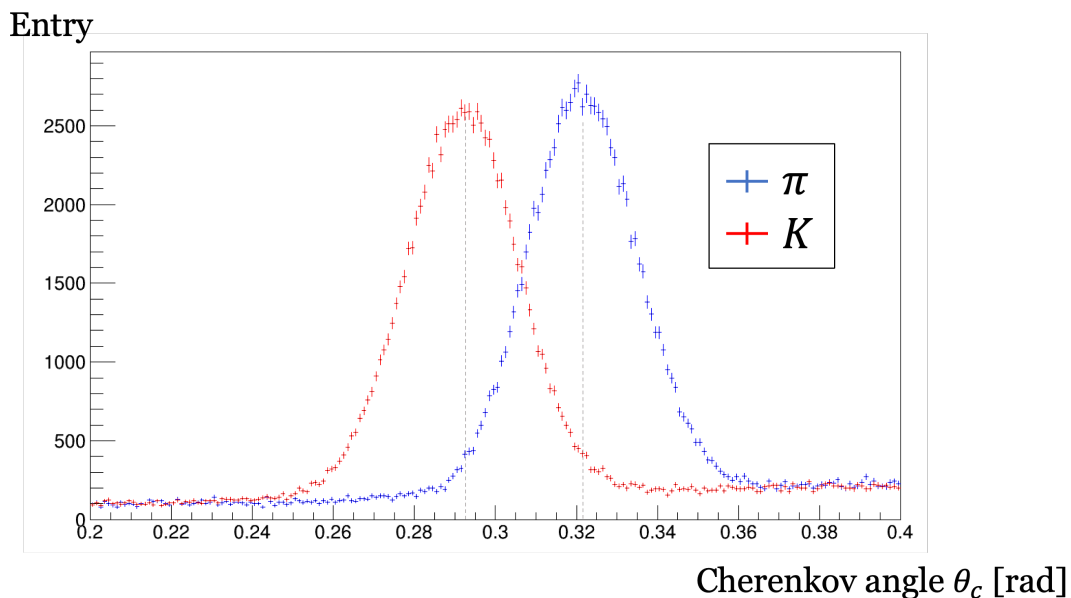


図 3.4: 3.5 GeV 付近での  $K$  粒子と  $\pi$  粒子のチェレンコフ角度分布

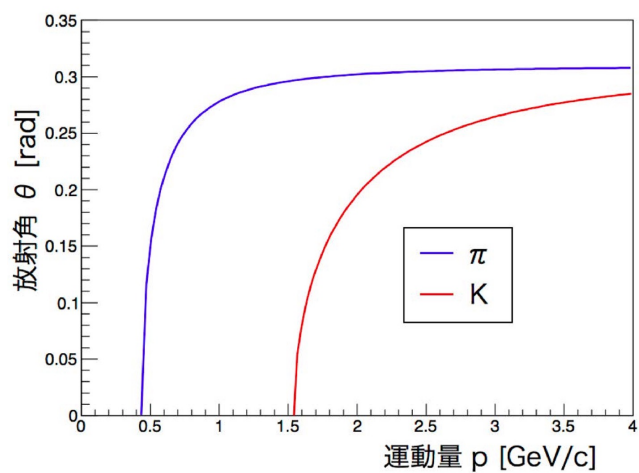


図 3.5:  $K$  粒子と  $\pi$  粒子のチェレンコフ角度の運動量依存性

トラックあたりの角度分解能  $\sigma_{track}$  は

$$\sigma_{track} = \frac{\sigma_{\theta}}{\sqrt{N_{p.e.}}} \quad (3.2)$$

$\sigma_\theta$  はチェレンコフ角度分解能、 $N_{p.e.}$  は検出光子数である。

ARICH 検出器では、1トラック当たり平均 10 個前後の光子が検出される。

## 3.2 ARICH 検出器の構成要素

ARICH 検出器は直径 2 m ほどのドーナツ型の形状で、主に 3 つの構成要素で成り立っている。荷電粒子からチェレンコフ光子を生成する輻射体シリカエアロゲル、高い位置分解能をもつ光検出器、そして読み出し回路である。ARICH 検出器内部の構造について、模式図を図 3.6 に示す。

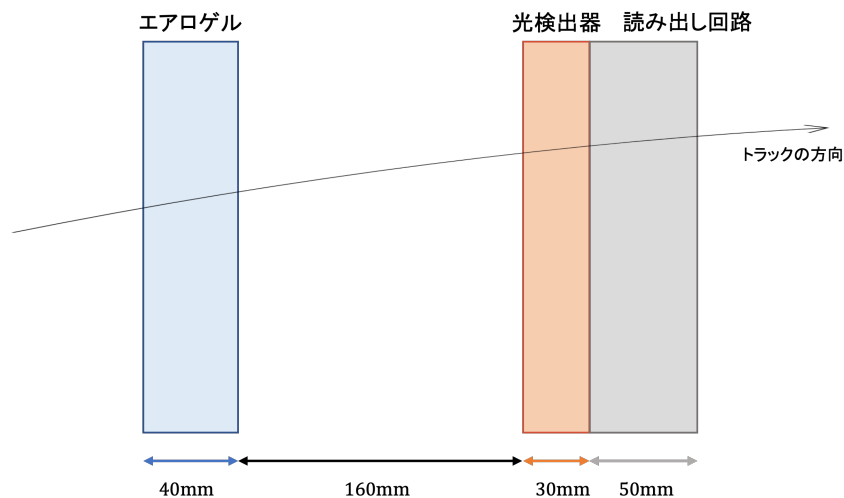


図 3.6: ARICH 検出器内部の構成

### 3.2.1 輻射体シリカエアロゲル

ARICH 検出器では、大きさ 170mm × 170mm × 20mm のシリカエアロゲルが、2 層構造で円形タイル上に 124 × 2 枚敷き詰めたシリカエアロゲルタイルを用いている。図 3.7 に示すように、タイルの内円の半径は約 440mm、外円の半径は約 1110mm であり、約 170mm のエアロゲルが 4 列敷き詰められている。エアロゲル (図 3.8) は半透明で、体積の 98% を空気が占める低密度な物質である。そのため、軽量かつ固体でありながら小さい屈折率を持つという特徴がある。そのほかにも、エアロゲルは二酸化ケイ素が 3 次元的に配列した多孔質物質であり、二酸化ケイ素の密度の調節により自由に屈折率を調節することができ、高い透過率を持つという特徴から、チェレンコフ光の輻射体として適している。

ARICH 検出器では、1 層目と 2 層目で異なる屈折率のエアロゲルを使用するデュアルレイヤー方式 (後述) を用いており、高い角度分解能を得ることができることが特徴である。衝突点側から 1 層目のタイルの屈折率  $n_1$  は 1.045 で透過長は 45 mm、2 層目の屈折率  $n_2$  は 1.055 で透過長は 35 mm である。

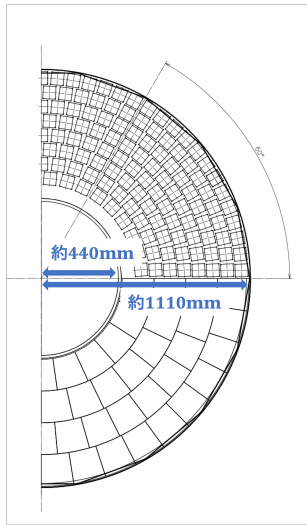


図 3.7: エアロゲルタイルの大きさ



図 3.8: 輻射体シリカエアロゲル [2]

### デュアルレイヤー方式

デュアルレイヤー方式とは、単層ではなく 2 層の異なる屈折率を持つエアロゲルを用いることで、検出光子数を増やしたままチェレンコフ角度分解能の改善を可能にする方法である。チェレンコフ光の放射点位置の不定性や検出光子数は、ARICH 検出器の性能を左右するトラックあたりのチェレンコフ角度分解能に影響を及ぼす。エアロゲルを厚くすることで放射光子の数を増やすことが可能になるが、チェレンコフ光の放射点位置の不定性が大きくなってしまいう問題点がある。そこで、異なる 2 つの屈折率のエアロゲルを重ねることで、同じ厚さの単層の場合よりもチェレンコフ角の放射点位置の不定性を減らしつつ、検出光子の数を増やすことが可能になった。デュアルレイヤーの模式図を図 3.9 に示す。

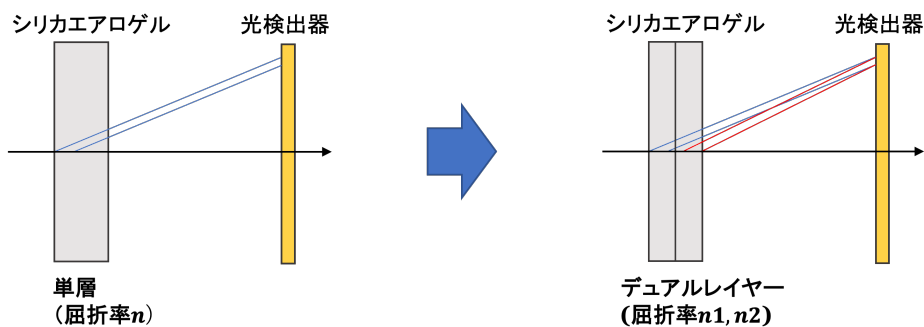


図 3.9: デュアルレイヤーの模式図

### 3.2.2 光検出器 HAPD

光検出器 HAPD(図 3.10) は大きさ 73 mm × 73 mm のモジュールで、ピクセルサイズは 4.9 mm × 4.9 mm の 144 チャンネルで構成されており、エアロゲルに対して 16cm 離れた位置にリング状に 420 個設置され

ている。また、リングの側面にはミラーが設置されており、より多くの光子を検出することができる仕組みとなっている。1.5Tの高磁場でも動作可能な放射線耐性と、高い位置分解能により1光子検出が可能であることが特徴である。

HAPDは表面(光電面)に入射された光子により放出される光電子を $-8\text{kV}$ の電圧で加速させてAPD(Avalanche Photo Detector)に衝突させる。光電子は、加速電圧による電子打ち込み増幅約1700倍と、APD内部で起こるAvalanche増幅約40倍により、全体でおよそ6万8000倍の増幅がされる。

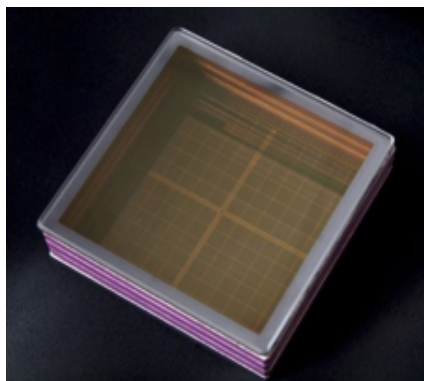


図 3.10: 光検出器 HAPD

### 3.3 粒子識別の手法

粒子を識別する際は、各トラックに対して再構成されるチェレンコフ角を電子、 $\mu$ 粒子、 $K$ 粒子、 $\pi$ 粒子、陽子、重陽子の6つの粒子仮説 $h$ の尤度関数の値 $L_h$ で評価する。ある粒子仮説 $h$ に対する尤度関数 $L_h$ は以下の式で表される。

$$L_h = \prod_{\text{all channel}} p_{h,i}(m_{h,i}) \quad (3.3)$$

$$p_{h,i}(m_{h,i}) = \frac{e^{-n_{h,i}} n_{h,i}^{m_{h,i}}}{m_{h,i}!} \quad (3.4)$$

$p_{h,i}(m_{h,i})$ はHAPDの $i$ 番目のピクセルで $m_{h,i}$ のヒットが観測される確率であり、このとき予想されるヒット数は $n_{h,i}$ である。ARICHでは単光子ヒットと多光子ヒットの区別をしていないため、 $p_{h,i}(m_{h,i})$ はヒットしていないか( $p_{h,i}(\text{nohit}) = e^{-n_{h,i}}$ )、ヒットしているか( $p_{h,i}(\text{hit}) = 1 - e^{-n_{h,i}}$ )の2つの場合で表すことが

できる。よって、式 3.3 は以下のように書きあらわすことができる。

$$\begin{aligned}
\log L_h &= \sum_{\text{all channel}} \log\{p_{h,i}(m_{h,i})\} \\
&= - \sum_{\text{no hit}} n_{h,i} + \sum_{\text{hit}} \log(1 - e^{-n_{h,i}}) \\
&= - \sum_{\text{no hit}} n_{h,i} - \sum_{\text{hit}} n_{h,i} + \sum_{\text{hit}} n_{h,i} + \sum_{\text{hit}} \log(1 - e^{-n_{h,i}}) \\
&= - \sum_{\text{all channel}} n_{h,i} + \sum_{\text{hit}} [n_{h,i} + \log(1 - e^{-n_{h,i}})] \\
&= -N_h + \sum_{\text{hit}} [n_{h,i} + \log(1 - e^{-n_{h,i}})] \tag{3.5}
\end{aligned}$$

$N_h$  は予想される光子のヒット数の合計数である。 $N_h$  は、エアロゲルの透過長や実験値に基づき予想される放射光子の数等によって算出される。 $n_{h,i}$  はチェレンコフ光子と粒子仮説の予想される角度分布を表す確率密度関数 (PDF) を光子検出器平面に投影し、ピクセル  $i$  の表面で積分することによって得られる。

各粒子に与えられた  $L_h$  や、対数をとった  $\log(L_h)$  を用いて、その粒子の  $K$  粒子らしさや  $\pi$  粒子らしさを見積り、それらの情報を用いて粒子識別を行なっている。

### 3.4 本研究の目的

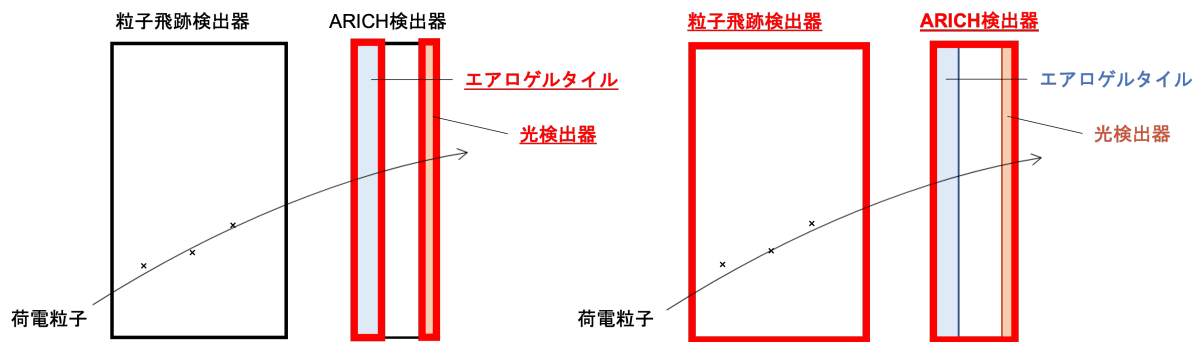
現在 BelleII 実験は本格稼働中であり、ARICH 検出器も今後 10 年の長期運用が見込まれている。3.1 節で述べた通り、ARICH 検出器の粒子識別性能には検出光子の位置が重要であるため、ARICH 検出器の位置のずれは粒子識別性能に直接影響を及ぼすと考えられる。長期運用される検出器の位置のずれを直接正すことは難しいため、ソフトウェア上で取得したデータを正す必要がある。以降、ソフトウェア上でデータを正すことをアライメントと呼ぶ。

本研究では、ARICH 検出器の位置のずれについて、ARICH 検出器内部のエアロゲルタイルと光検出器の位置に関するずれと、Belle II 測定器における ARICH 検出器の位置に関するずれについて、それぞれ 4 章と 5 章で述べる。(図 3.11)

4 章では、ARICH 検出器内部の位置のずれについて調べ、想定されるずれの値の概算や粒子識別性能への影響について述べる。

5 章では、Belle II 測定器に対する ARICH 検出器全体の位置のずれの概算と補正 (アライメント)、粒子識別性能への影響について述べる。





ARICH検出器内での  
エアロゲルタイルと光検出器  
間の相対的なずれ（4章）

ARICH検出器と粒子飛跡検出器  
間の相対的なずれ（5章）

図 3.11: 4章で扱う位置のずれと5章で扱う位置のずれの対象の違い

## 第 4 章

# ARICH 検出器のエアロゲルの位置のずれと 粒子識別への影響

3 章で述べた通り、Belle II 測定器に対する ARICH 検出器のずれは粒子識別性能に影響を及ぼすため、先行研究や 5 章で述べるような ARICH 全体の Belle II 測定器に対するずれの測定や、アライメントがなされてきた。[14][13] しかし、ARICH 検出器内部の構成要素の位置のずれ、つまり光検出器に対するエアロゲルタイトルの位置のずれに関しては未だ詳細な研究はなされていない。

本章では、光検出器に対するエアロゲルタイトルの位置のずれが見られるかどうか確認を行い、想定されるずれの概算結果と、エアロゲルタイトルのずれによる ARICH 検出器の粒子識別性能への影響に関して考察する。

### 4.1 概要

エアロゲルタイトルの位置のずれをみるために、検出光子数、検出光子の位置から求めたチェレンコフ角や、他の検出器 (CDC) から外挿したエアロゲルタイトルを通過する粒子の飛跡 (トラック) の位置等のデータを用いる。実際にずれの値の概算を行う際には、ずれのない理想的な検出器のデータとしてモンテカルロシミュレーションデータ (以降、MC とする) を使用し、実験データとの比較を行うことで、ずれの値を見積もる。

座標軸は図 4.1 のように、 $z$  軸が電子ビームの方向 (=エアロゲルタイトルから光検出器に向かう方向) で、ARICH 検出器のドーナツ型の円の中心を通るように設定し、 $y$  軸を鉛直上向き方向、 $x$  軸を  $y$  軸・ $z$  軸と垂直な方向とする。 $x$  と  $y$  のなす角を  $\varphi$  とする。

また、今回はエアロゲルタイトルの  $x$ - $y$  平面内の位置の移動 (平面方向のずれ) と光検出器の方向への倒れ込み ( $z$  方向のずれ) で別々にずれの概算を行う。それぞれずれの概算の方法や用いるパラメータが異なるため、詳細は各セクションで述べる。

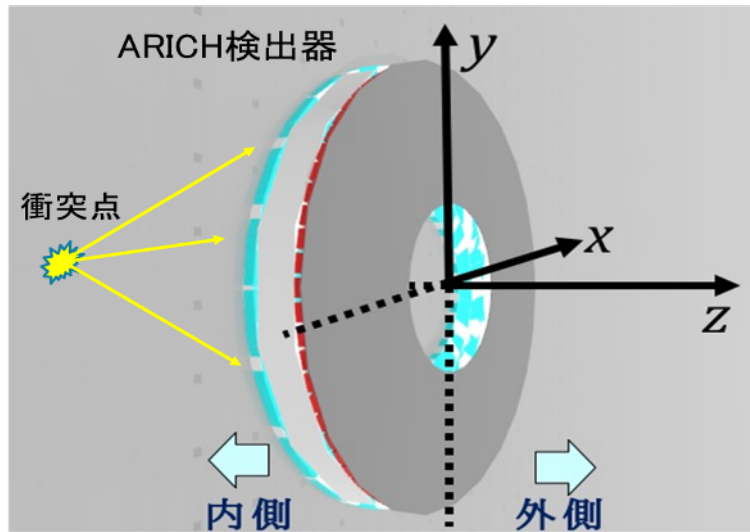


図 4.1: 使用する座標軸

## 4.2 平面方向のずれの概算

エアロゲルタイトルの  $x$ - $y$  平面方向のずれについて考える。

エアロゲルタイトルの構造は、3.2.1 節で述べた通り、アルミニウムの枠組みにエアロゲルを 2 層になるように嵌め込み、糸で固定した作りとなっている。(図 4.2) アルミ枠の厚さは 1mm で、エアロゲルタイトルとアルミ枠の隙間は 1mm になるように設計されている。つまり、エアロゲルタイトル間の隙間 + アルミ枠の厚さは 3mm となる。

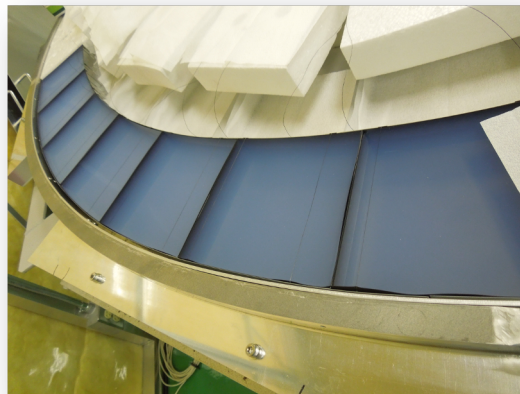


図 4.2: アルミ枠に嵌め込まれているエアロゲル

エアロゲルタイトルを通過する荷電粒子によるチェレンコフ光の平均検出光子数は 10 ~ 20 個程度であるのに

対して、エアロゲルタイルとアルミ枠の隙間や、アルミ枠の部分を通る粒子は光子を放出しないため、検出光子は0個となる。そのため、実験データとMCでエアロゲル平面上におけるトラックの検出光子数の位置依存性を比較することで、平面方向のずれの概算を行う。

#### 4.2.1 手法

##### 1. 実験データの検出光子数のトラック位置依存性を求める

まず、実験データから、荷電粒子トラックがエアロゲルを通過する位置による検出光子の依存性を求め、平面方向のずれがあるかどうか確認を行う。具体的には、縦軸と横軸それぞれをエアロゲル平面上でのトラックのy位置とx位置、色軸をエアロゲル平面上の1ピンの領域を通過したトラックの平均検出光子数とした2次元ヒストグラムについて、実験データとMCの差を取って表示することで、実験データの検出光子数の位置依存性を得る。

理想的には各ピンの値が0になるはずであるが、エアロゲルタイルの隙間やアルミ枠の構造が見られた場合、平面方向にずれている可能性があると考えられる。

##### 2. 平面方向のずれを模擬したシミュレーションデータの検出光子数の位置依存性を求める

エアロゲルタイルがずれている可能性があるとうわかったら、エアロゲルタイルの平面方向のずれを模擬したシミュレーションデータを作成し、同様に検出光子数の位置依存性を求める。具体的には、各エアロゲルタイルをx-y平面上で回転させたシミュレーションデータ(MC\_rotated)を作成し、実験データと同様に理想的な配置のMCと比較することで検出光子数の位置依存性を求める。単純に実験データとMCから求めた検出光子数の位置依存性から幾何的にずれの概算を行うのではなく、ずれを模擬したシミュレーションデータを用いることで、光検出器の構造やエアロゲルの屈折率の個体差のような手計算では計算が難しい影響を考慮をしている。

##### 3. 1と2の結果を比較し、実験データのずれの値を概算

最後に、実験データとMC\_rotatedの検出光子数の位置依存性の結果を比較することで、エアロゲル平面方向のずれの概算を行う。

#### 4.2.2 使用したデータ

使用したデータは2019年3月～2020年6月に取得した実験データ、ずれのない理想的なシミュレーションデータのMC、平面方向のずれを模擬したシミュレーションデータMC\_rotatedの3種類である。MC\_rotatedは、各エアロゲルをφ方向に1mm移動させたものを用いる。(図4.3)

また、本研究では $e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$ 事象を用いる。そのためECLやCDCなど他の検出器から外挿した情報を用いた運動量等の制限(カット)や、背景事象である $e^+ + e^- \rightarrow e^+ + e^-$ を排除するようなカットを全てのデータに課した。他にも、光検出器側面にあるミラーに反射した光子やトラックの方向等のカットを課すことで、電子や陽電子の散乱事象を排除した。

カット後のイベント数は、実験データが約1340万イベント、MCが約1000万イベント、MC\_rotatedが約15万イベントである。



z軸

## エアロゲルの位置

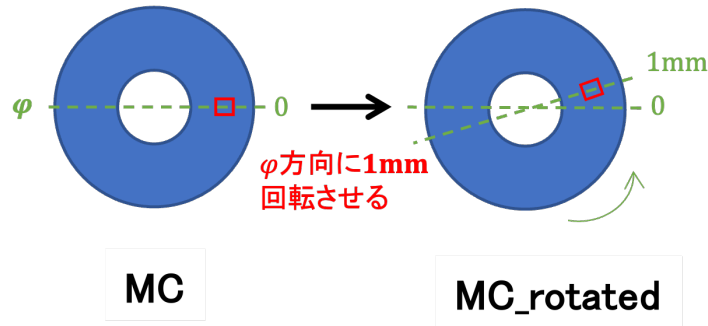


図 4.3: エアロゲルを  $\varphi$  方向に 1mm 回転させた MC\_rotated

### 4.2.3 結果

#### 1. 実験データの検出光子数のトラック位置依存性を求める

エアロゲル平面上におけるトラック位置ごとの平均検出光子数の 2 次元マップについて、実験データの結果を図 4.4 に、MC の結果を図 4.5 に示す。

縦軸はエアロゲルの  $y$  軸、横軸はエアロゲルの  $x$  軸、色軸はエアロゲル平面上の 1 ビンの領域を通過した実験データもしくは MC のトラックの平均検出光子数である。両者とも、1 ビンの大きさは  $0.2 \times 0.2$ cm である。

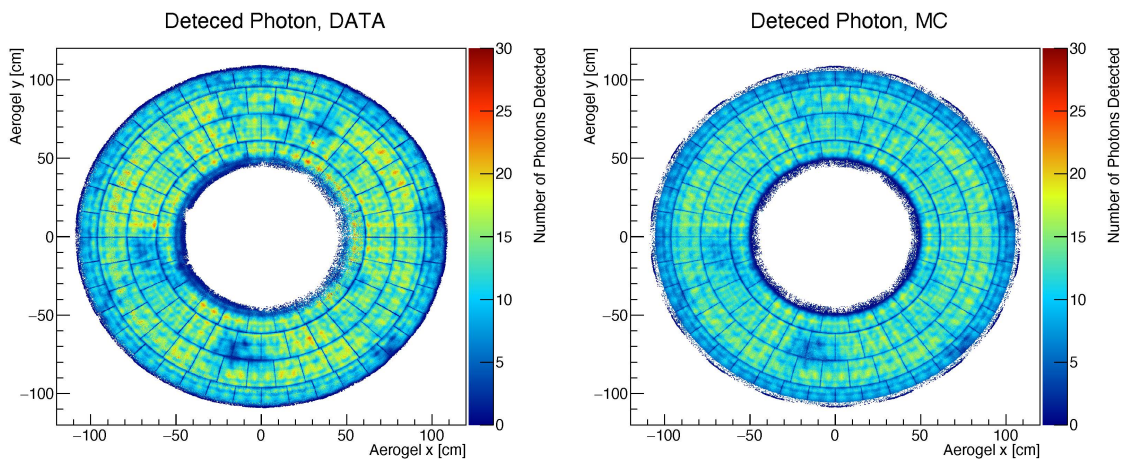


図 4.4: エアロゲル上での検出光子数 (DATA)

図 4.5: エアロゲル上での検出光子数 (MC)

一部実験データと MC の同じ場所で極端に青い箇所があるが、これはデータ取得時期に稼働停止していた光検出器の影響である。

どちらの分布もエアロゲルタイトルの縁で検出光子数が少なくなっていることがわかる。両者の分布の差をとることで、実験データの検出光子数のトラック位置依存性について確認する。(図 4.6)

## Detected Photon (DATA-MC)

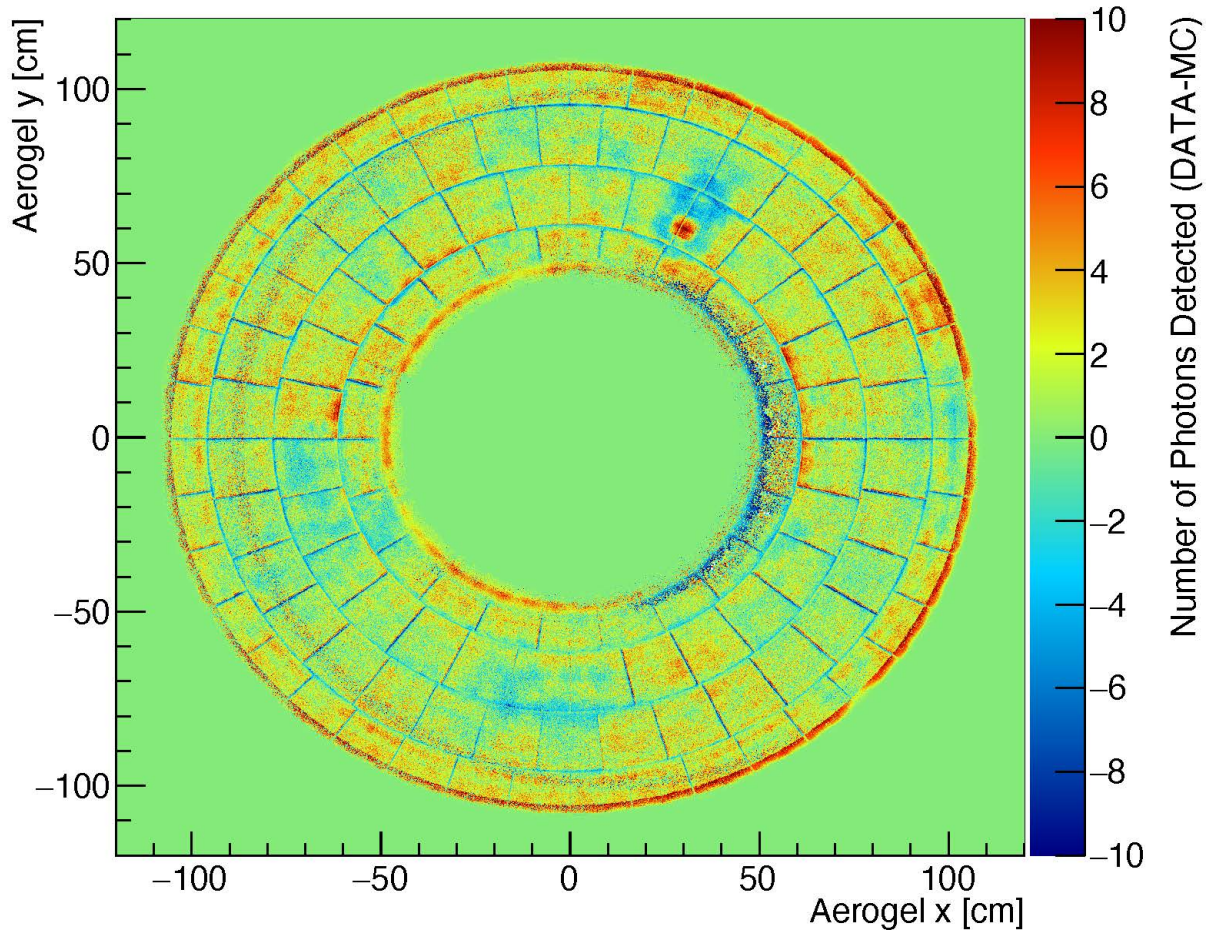


図 4.6: エアロゲル上での検出光子数の差 (DATA-MC)

色軸の値は、図 4.4 の各ビンの値から、対応する位置にある図 4.5 のビンの値を引いた平均検出光子数の差 ( $\Delta dp$ ) である。よりわかりやすく違いを見るために図 4.4、4.5 よりも軸のスケールを大きくしている。

全体的に実験データの検出光子数が MC に比べて多いが、カットしきれなかった電子陽電子散乱などの背景事象と考えられる。また、ARICH 外縁では全体的に実験データの検出光子数が多く、内縁では  $x$  軸に非対称に分布が偏っていることがわかる。外縁はカットしきれなかったミラーに反射した光子の影響と考えている。内縁は、Belle II 実験では電子と陽電子を一定の速さで角度をつけて衝突させるため、ローレンツブーストの影響で ARICH 検出器に入射する  $\mu^+\mu^-$  の軌道に制限がかかり、 $+x$  方向の実験データの一部箇所において検出光子数が 0 となってしまったためと考えられる。

4.2.1 節で述べた通り、 $x-y$  方向のずれに関して見たいため、青くアルミ枠の構造と見られる箇所について



一部拡大したもの ( $\varphi$  が 0 付近) が、図 4.7 である。

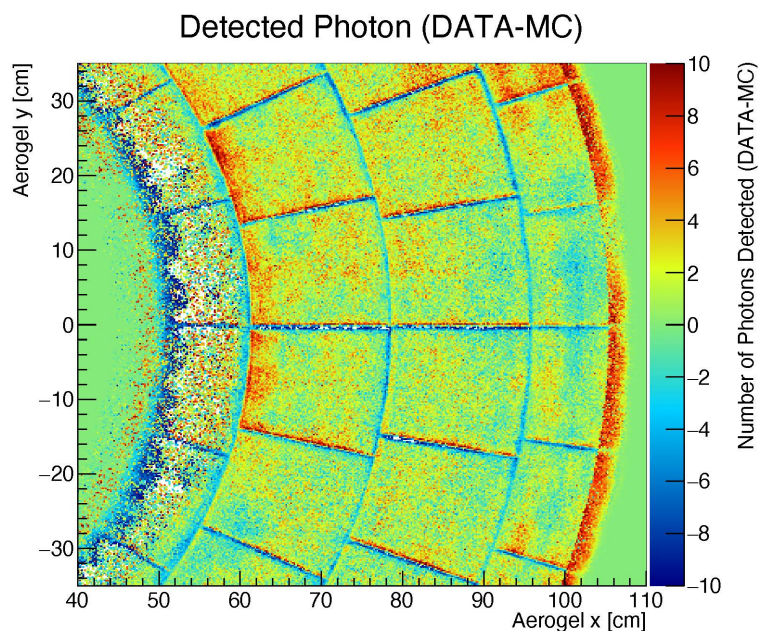


図 4.7: エアロゲル上での検出光子数の差 (DATA-MC),  $\varphi$  が 0 付近

図 4.7 を見て見ると、エアロゲルタイルの境目の箇所に赤い線と青い線が並行に並んでいることがわかる。これが平面方向のずれと考えられる。

例として、ずれが比較的大きそうな、 $\varphi \simeq 0$  で内側から 2 列目のエアロゲルタイル間の光子数の差について詳しくみてみる。横軸  $\varphi$ 、縦軸に  $\Delta dp$  (=図 4.6 の色軸)、ビン幅 0.001rad の 1 次元ヒストグラムを作成する。(図 4.8)

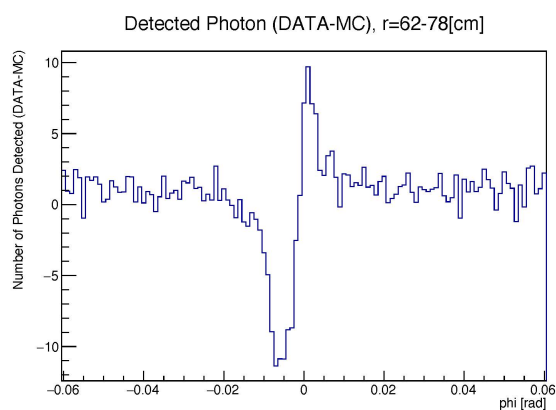


図 4.8:  $\varphi$  方向の検出光子数の差 (DATA-MC),  $62 < r < 78\text{cm}$  かつ  $\varphi \simeq 0\text{rad}$

図 4.8 を見てみると、 $\varphi = 0$  付近で  $\Delta dp$  が段のように見える。この段のビンの数と、実際のエアロゲルタイ

ル間の隙間のサイズから平面方向のずれの大きさを見積もる。(図 4.9)

段になっている箇所のピン数は約 17 ピンである。ピン幅は 0.001rad に相当するので、17 ピンは約 0.017rad にあたる。4.2 節より、設計上のエアロゲルタイル間の隙間 3mm(～ 0.0042rad) を考慮すると、実験データと MC のずれの大きさは約 0.0064rad と算出される。

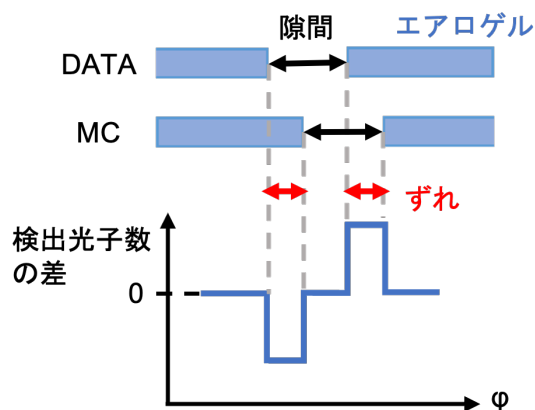


図 4.9: 実験データと MC の検出光子数の差とエアロゲルタイル間の隙間の関係

## 2. 平面方向のずれを模擬したシミュレーションデータの検出光子数の位置依存性を求める

次に、MC の一部とエアロゲルの平面方向 1mm のずれを模擬したシミュレーションデータ (MC\_rotated) の  $\Delta dp$  からずれの値を同様に算出し、実験データのずれの値と比較を行う。実験データのときと同様に  $\varphi \simeq 0$  で内側から 2 列目のエアロゲルタイル間のずれの値について概算する。縦軸に MC\_rotated と MC の  $\Delta dp$  の 1 次元ヒストグラムを図 4.11 に示す。ピン幅は図 4.9 と同じ 0.001rad である。

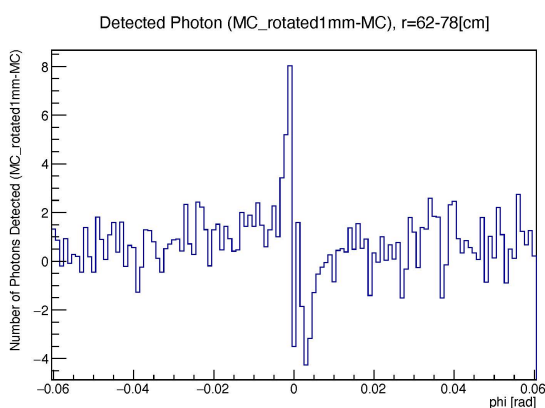


図 4.10:  $\varphi$  方向の検出光子数の差 (MC\_rotated1mm-MC),  $62 < r < 78\text{cm}$  かつ  $\varphi \simeq 0\text{rad}$

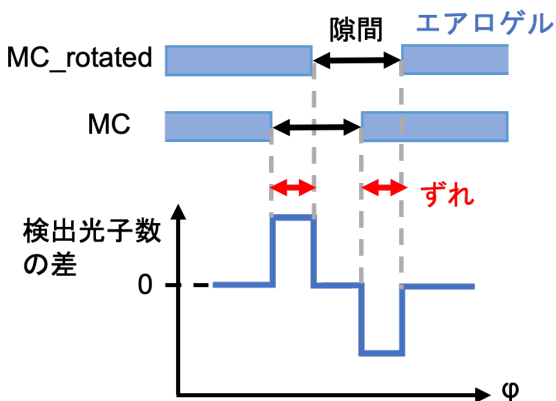


図 4.11: エアロゲルを  $\varphi$  方向に 1mm 回転させた MC\_rotated と MC の検出光子数の差とエアロゲルタイル間の隙間の関係



段になっている箇所では 11 ビン程度であるので約 0.011rad にあたる。実験データと同様に、設計上のエアロゲルタイル間の隙間 0.0042rad を考慮すると、エアロゲルを  $\varphi$  方向に 1mm 回転させた MC\_rotated と MC のずれの大きさは約 0.0034rad と算出される。

### 3. 1 と 2 の結果を比較し、実験データのずれの値を概算

実験データのずれの大きさは約 0.0064rad であった。今回 1mm ずらした MC\_rotated のずれの大きさが約 0.0034rad であったため、比較すると、実験データのずれは  $-\varphi$  方向に約 1.9mm にあたる。つまり、 $\varphi \simeq 0$  で内側から 2 列目のエアロゲルタイル間のずれの値は  $-\varphi$  方向に約 1.9mm であり、エアロゲルタイルは平面方向に約 1.9mm 程度ずれている可能性があるという結果が得られた。

4.2 節で述べた通りエアロゲルタイル間の空間は隙間 1mm+ アルミ枠 1mm+ 隙間 1mm であるので、最大 2mm のずれが構造的に許される値である。そのため、約 1.9mm 程度のずれも想定内といえる。

## 4.3 z 方向のずれの概算

次に、エアロゲルタイルの z 方向のずれについて考える。

3.1 節で述べた通り、ARICH 検出器の粒子式識別にはチェレンコフ角を用いており、その大きさは識別する粒子の質量に依存する。しかし、エアロゲルタイルの距離が z 方向にずれることで、エアロゲルと光検出器間の距離が変わってしまうため、チェレンコフ光の放射位置が本来とは異なる場所で再構成され、算出されるチェレンコフ角に影響を及ぼすと考えられる。(図 4.12)

そのため、エアロゲルが z 方向にずれている場合、エアロゲル平面上におけるチェレンコフ角度の分布に違いが見られると考え、エアロゲル平面上のトラック位置に対するチェレンコフ角の位置依存性を比較することで、z 方向のずれの概算を行う。

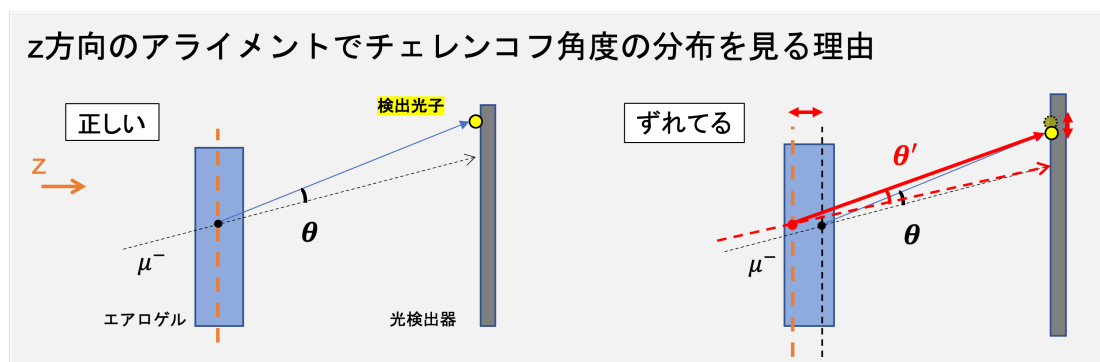


図 4.12: z 方向のずれとチェレンコフ角度のずれの関係

### 4.3.1 手法

位置依存性の求め方等は 4.2.1 節と同様なので割愛するが、今回は検出光子数ではなく、チェレンコフ角のエアロゲル上でのトラック位置に対する依存性を見る。また、ずれを模擬したシミュレーションデータに関しても、4.3.2 節で述べる z 方向にエアロゲルタイルを傾けたシミュレーションデータを使用する。

### 1. 実験データのチェレンコフ角の位置依存性を求める

まず、実験データのエアロゲル平面上におけるチェレンコフ角の位置依存性を求め、 $z$  方向のずれがあるかどうか確認を行う。位置依存性を求める際には、平面方向のずれを概算したときと同様に、実験データと MC で平均チェレンコフ角差をとって 2 次元ヒストグラムで表示する。

### 2. $z$ 方向のずれを模擬したシミュレーションデータのチェレンコフ角の位置依存性を求める

エアロゲルタイルの位置がずれている可能性があるとわかったら、エアロゲルタイルの  $z$  方向のずれを模擬したシミュレーションデータを作成し、同様にチェレンコフ角の位置依存性を求める。具体的には、各エアロゲルタイルを  $+z$  方向に傾けたシミュレーションデータ (MC\_tilted) を作成し、実験データと同様に MC と比較する。

### 3. 1 と 2 の結果を比較し、実験データのずれの値を概算

最後に、実験データと MC\_tilted のチェレンコフ角の位置依存性の結果を比較することで、 $z$  方向のずれの概算を行う。

## 4.3.2 使用したデータ

使用した実験データと MC は 4.2.2 節のものと同じものを使用した。カット条件も 4.2.2 節のものと同様である。

また、今回は  $z$  方向のずれを模擬したシミュレーションデータとして、2 層のエアロゲルの外側の縁を、内側に対して  $z$  方向にそれぞれ 10mm 傾けた MC\_tilted を用いた。(図 4.13) MC\_tilted を作成する際には、チェレンコフ光の放射点位置や、エアロゲル内部の屈折率の調整等も考慮した。

イベント数も同様に、実験データが約 1340 万イベント、MC が約 1000 万イベント、そして MC\_tilted は約 20 万イベントである。

## エアロゲルの位置

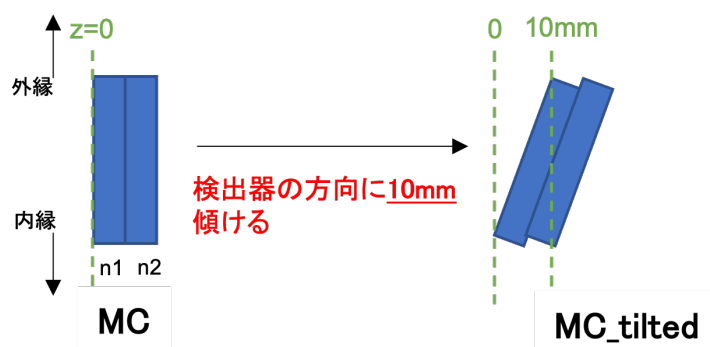


図 4.13: エアロゲルを  $z$  方向に 10mm 傾けた MC\_tilted

### 4.3.3 結果

#### 1. 実験データのチェレンコフ角の位置依存性を求める

実験データのエアロゲル平面上におけるチェレンコフ角の位置依存性を求める。エアロゲル平面上におけるトラックの平均チェレンコフ角の2次元マップについて、実験データの結果を図 4.14 に、MC の結果を図 4.15 に示す。

縦軸はエアロゲルの y 軸、横軸はエアロゲルの x 軸、色軸はエアロゲル平面上の 1 ビンの領域を通過した実験データもしくは MC のトラックの平均チェレンコフ角である。平面方向のときと同様に、両者とも 1 ビンの大きさは  $0.2 \times 0.2\text{cm}^2$  である。

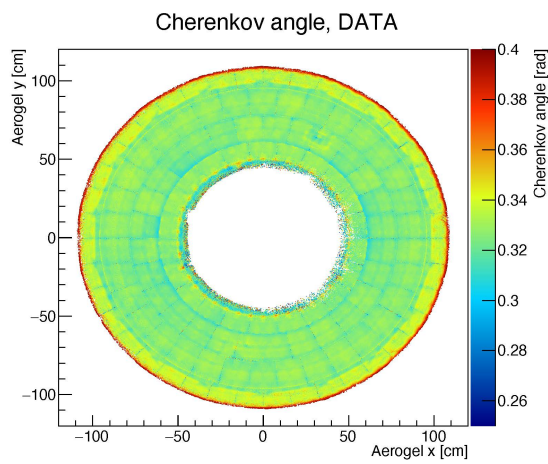


図 4.14: チェレンコフ角のエアロゲル上での二次元マップ (DATA)

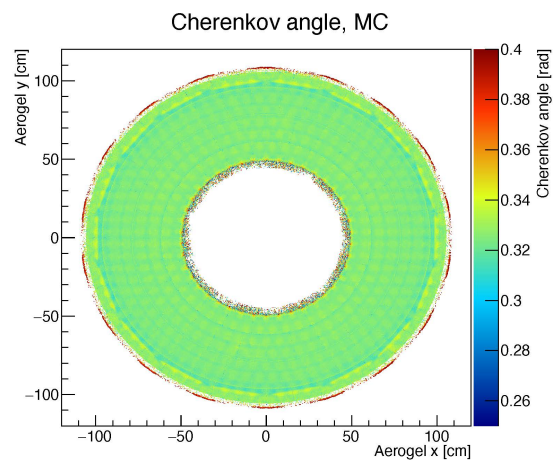


図 4.15: チェレンコフ角のエアロゲル上での二次元マップ (MC)

両者の分布の差をとることで、実験データのチェレンコフ角の位置依存性について確認する。(図 4.16)

## Cherenkov angle (DATA-MC)

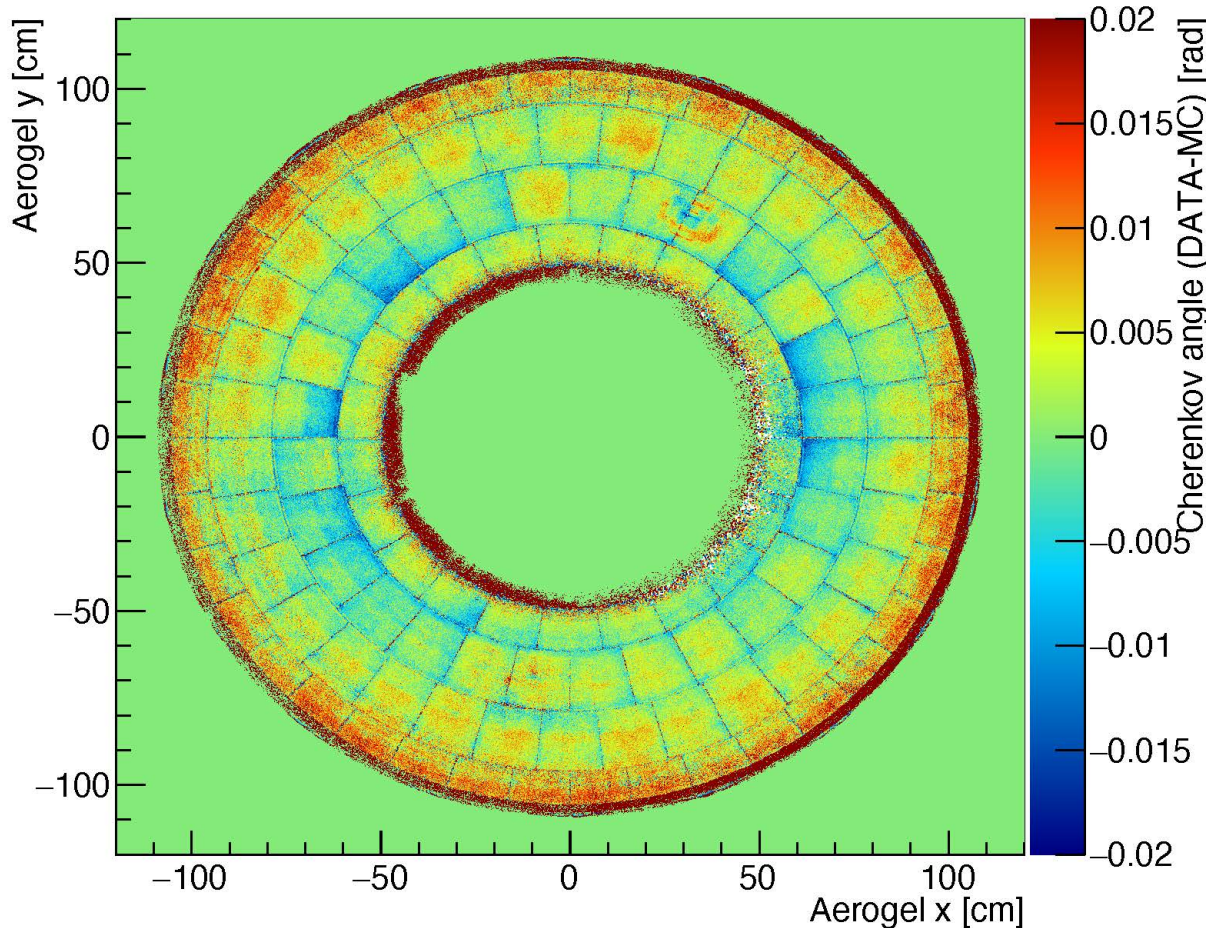


図 4.16: エアロゲル上でのチェレンコフ角の差 (DATA-MC)

色軸の部分は、図 4.4 の各ビンの値から、対応する位置にある図 4.5 のビンの値を引いたチェレンコフ角の差 ( $\Delta\theta_c$ ) である。よりわかりやすく違いを見るために図 4.14、4.15 よりも軸のスケールを大きくしている。

外縁と内縁で分布に偏りがあることは、検出光子の分布と同様、ミラーに反射した光子や  $\mu^+\mu^-$  の軌道の影響と考えている。

また、各エアロゲルの中心部と枠付近でチェレンコフ角に偏りが見られるが、原因不明であるため今後の課題として更に調べる必要がある。

図 4.6 と同様にアルミ枠の構造が見えるが、内側から 2 列目のタイルに数個  $\Delta\theta_c$  が大きい箇所が見られる。これらの  $\Delta\theta_c$  の大きさは最大で 0.016rad である。この  $\Delta\theta_c$  が、エアロゲルの縁の位置が  $z$  方向にずれている影響であると仮定し、ずれの値を概算する。

### 2. $z$ 方向のずれを模擬したシミュレーションデータのチェレンコフ角の位置依存性を求める

次に、MC の一部とエアロゲルの外側の縁の  $z$  方向への 10mm のずれを模擬したシミュレーションデータ

(MC\_tilted) の  $\Delta\theta_c$  を求め、実験データの  $\Delta\theta_c$  と比較を行いずれの値を概算する。

MC\_tilted に関するエアロゲル平面上におけるトラックの平均チェレンコフ角の 2 次元マップを図 4.17 に、MC のチェレンコフ角 (図 4.15) との差  $\Delta\theta_c$  をとったものを図 4.18 に示す。

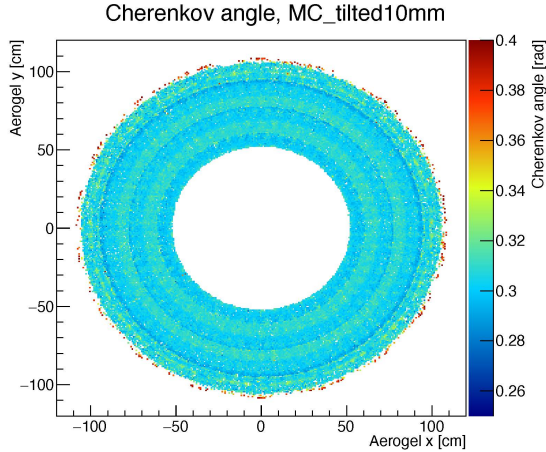


図 4.17: エアロゲルの外側の縁を 10mm 傾けた MC のチェレンコフ角のエアロゲル上での二次元マップ

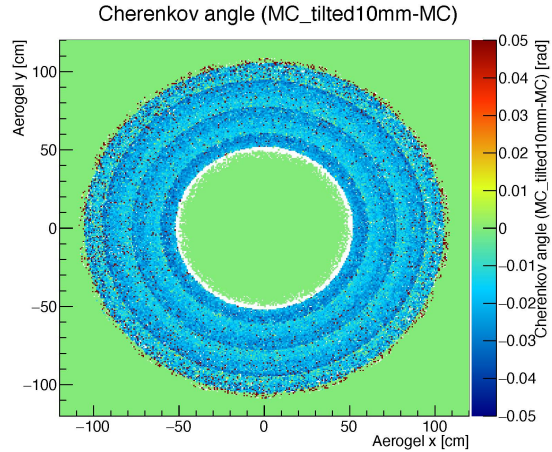


図 4.18: エアロゲルの外側の縁を 10mm 傾けた MC と通常の MC のチェレンコフ角の差  $\Delta\theta_c$  のエアロゲル上での二次元マップ

色軸のスケールはそれぞれ別のスケールである。

どちらの図も、各エアロゲルタイルの外縁を 10mm ずらした箇所でチェレンコフ角が小さくなっていることがわかる。図 4.18 の  $\Delta\theta_c$  が一番大きい値は約 0.03rad である。

### 3. 1 と 2 の結果を比較し、実験データのずれの値を概算

実験データの  $\Delta\theta_c$  の大きさは最大で 0.016rad であった。今回、MC\_tilted の  $\Delta\theta_c$  の大きさは、10mm ずらした箇所で最大約 0.03rad であったため、比較すると、実験データのずれは z 方向に最大約 5.3mm ずれている可能性があるという結果が得られた。

## 4.4 チェレンコフ角度分解能への影響

x-y 平面方向と z 方向のそれぞれのエアロゲルのずれが、ARICH 検出器の粒子識別性能へ及ぼす影響を見積もる。

粒子識別性能は  $K/\pi$  識別性能  $S$  で評価することができる。

$$S = \frac{\Delta_{(\pi-K)}\theta_c\sqrt{N_{p.e.}}}{\sigma_{\theta_c}} \quad (4.1)$$

$\sigma_{\theta_c}$  はチェレンコフ角度分解能、 $N_{p.e.}$  は検出光子数である。また、 $\Delta_{(\pi-K)}\theta_c$  は、式 3.1 より、ある運動量  $p$  における  $\pi$  と  $K$  のチェレンコフ角の違いであり、以下のような式で与えられる。



$$\Delta_{(\pi-K)}\theta_c = \arccos\left(\frac{\sqrt{(m_\pi/p)^2 + 1}}{n}\right) - \arccos\left(\frac{\sqrt{(m_K/p)^2 + 1}}{n}\right) \quad (4.2)$$

今回は、4.2.2、4.3.2 節で使用した  $e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$  事象のシミュレーションデータを用いる。通常の MC に対して、各エアロゲルを xy 平面内で 1mm 回転させた MC\_rotated と、z 方向に 10mm 傾けた MC\_tilted の 2 種類データで  $K/\pi$  識別性能  $S$  を比較する。

例として、運動量  $p = 4\text{GeV}$ 、検出光子数  $N_{p.e.} = 10$  と仮定し、簡単のためエアロゲルの屈折率  $n = 1.045$  としたときのそれぞれの  $S$  を比較する。 $\pi$  の質量  $m_\pi = 139\text{MeV}$ 、 $K$  の質量  $m_K = 494\text{MeV}$  であるので、式 4.2 に代入すると、以下の値を得ることができる。

$$\begin{aligned} \Delta_{(\pi-K)}\theta_c &= \arccos\left(\frac{\sqrt{(0.139/4)^2 + 1}}{1.045}\right) - \arccos\left(\frac{\sqrt{(0.494/4)^2 + 1}}{1.045}\right) \\ &= 0.29254\text{rad} - 0.26836\text{rad} \\ &= 0.02418\text{rad} \end{aligned}$$

また、各データにおけるチェレンコフ角をガウス関数と一次関数でフィットすることにより算出できるチェレンコフ角度分解能  $\sigma_{\theta_c}$  は、図 4.19、4.20、4.21 のそれぞれの図の統計ボックスに記載してある p2 の値であり、MC が  $\sigma_{\theta_c} = 0.01352\text{rad}$ 、MC\_rotated が  $\sigma_{\theta_c} = 0.01355\text{rad}$ 、MC\_tilted が  $\sigma_{\theta_c} = 0.01501\text{rad}$  である。

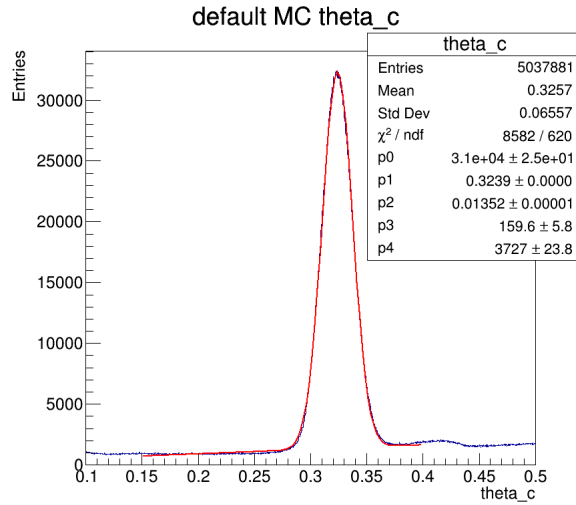


図 4.19: MC のチェレンコフ角度分布

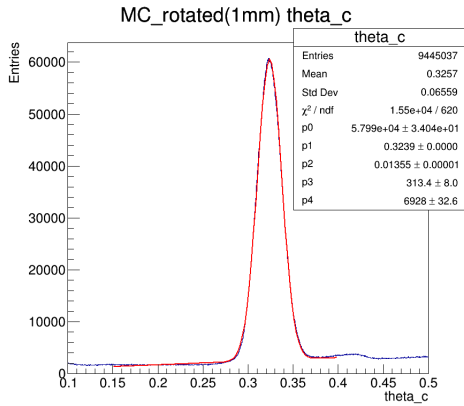


図 4.20: エアロゲルを  $xy$  平面内で 1mm 回転させた MC のチェレンコフ角度分布

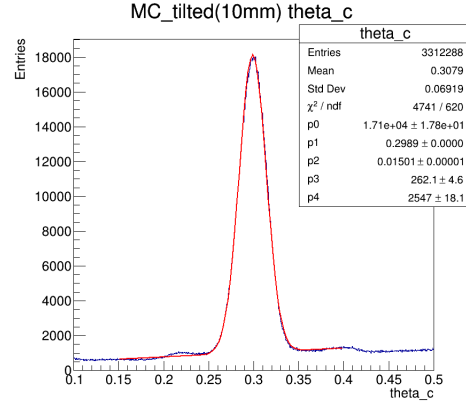


図 4.21: エアロゲルを  $z$  方向に 10mm 傾けた MC のチェレンコフ角度分布

式 4.1 に  $\Delta_{(\pi-K)}\theta_c$  とそれぞれの  $\sigma_{\theta_c}$  を代入し、 $S$  を算出する。

$$S_{\text{MC}} = \frac{0.02418 \times \sqrt{10}}{0.01352} = 5.656$$

$$S_{\text{MC\_rotated}} = \frac{0.02418 \times \sqrt{10}}{0.01355} = 5.643$$

$$S_{\text{MC\_tilted}} = \frac{0.02418 \times \sqrt{10}}{0.01501} = 5.094$$

MC に対して MC\_rotated の粒子識別性能は約  $0.013\sigma$  と僅かに低下し、MC\_tilted の粒子識別性能は約  $0.562\sigma$  低下した。

ここで、今回算出した予測されるエアロゲルのずれの大きさは、平面方向で最大 1.9mm、 $z$  方向で最大 5.3mm であった。平面方向のエアロゲルのずれの大きさと粒子識別性能  $S$  は比例関係に無く、ある程度以上のずれに対しては粒子識別性能の低下は見られなくなると考えられるが、控え目に見積もって比例関係にあるとした場合でも、平面方向の 1.9mm は  $S$  が約  $0.025\sigma$  低下すると見積もられ、粒子識別性能への影響が少ない。一方、 $z$  方向へのエアロゲルの位置のずれは、チェレンコフ角の変化に対して近似的に比例関係にあるため、 $z$  方向の 5.3mm のずれにより  $S$  が約  $0.298\sigma$  低下すると見積もられ、粒子識別性能に影響を及ぼすと考えられる。

## 第 5 章

# ARICH 検出器のアライメント

3 章で述べた通り、ARICH 検出器は検出光子の位置と他の検出器によるトラックの情報を用いて粒子識別性能を行なっているため、検出光子の位置のずれは粒子識別性能に直接影響を及ぼすと考えられる。

下記の図 5.1 は、ARICH 検出器がずれているときとずれていないときのチェレンコフ角の違いを表した模式図である。トラックの情報は ARICH 外部にある飛跡検出器からの情報を使用しているため、他の検出器に対して ARICH 検出器がずれてしまうことで、トラックに対する検出光子の位置がずれてしまう。そのため、トラックと検出光子の位置から再構成されるチェレンコフ角も、本来のチェレンコフ角 ( $\theta_c$ ) とは異なる大きさのチェレンコフ角 ( $\theta'_c$ ) に再構成される。(図 5.1)

本章で述べる ARICH 検出器のアライメントでは、4 章で述べた ARICH 検出器内部のずれについては考慮せず、ARICH 検出器と他の検出器 (例えば CDC や ECL 等) との位置のずれを概算し、補正するプログラムを組み込むことを目的とする。

最終的な結果である、アライメント適応前後での ARICH 検出器の粒子識別性能の影響については 6 章で述べる。また、先行研究の ARICH 検出器のアライメントとの違いについては 5.3 節で述べる。

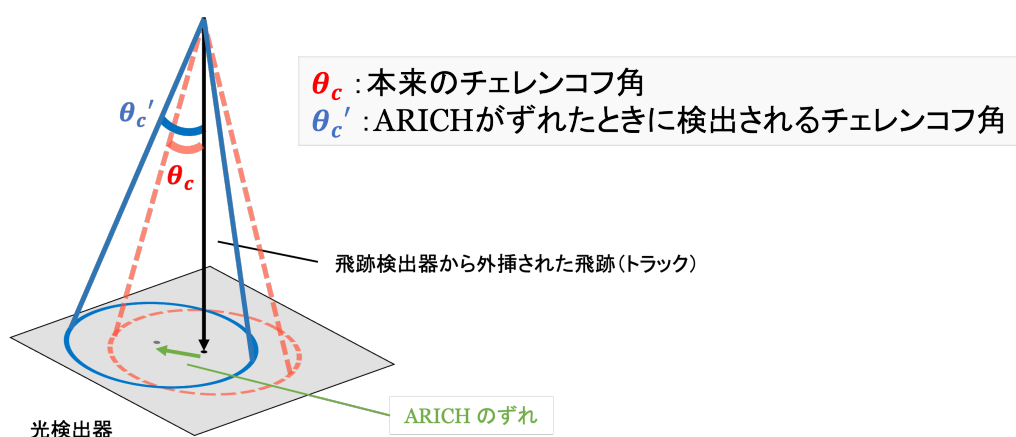


図 5.1: ARICH 検出器が正しい位置にあるときとずれた位置にあるときのチェレンコフ角



## 5.1 アライメント

本研究のアライメントでは、実験データの ARICH 検出器のずれの値を 6 パラメータで表現し、最終的に求めたパラメータの値を用いてずれの補正を行う。6 パラメータの詳細は 5.1.2 節で述べる。

アライメントでは、実験データのチェレンコフ角  $\theta_c$  やトラック中心から見た方位角  $\phi_{ch}$ 、エアロゲルの屈折率  $n$  のデータを用いる。(図 5.2) ARICH 検出器がずれている場合、光検出器におけるトラックの入射位置とチェレンコフリングの中心位置がずれて観測されるはずである。つまり、 $\theta_c$  の値が  $\phi_{ch}$  依存性を持つとき、ARICH 検出器がずれていると考えられる。また、屈折率  $n$  は、チェレンコフ光放射点位置の不確定性のため、トラックごとに算出した光子の放射確率による 2 層の屈折率の加重平均の値を使用しており、変数である。式 3.1 より、 $n \cos \theta_c$  は粒子の速度や質量に依存するが屈折率  $n$  に依らない値となるため、本研究では  $\theta_c$  ではなく  $n \cos \theta_c$  を扱う。

以上のことから、本研究では ARICH 検出器のずれを確認するために、 $n \cos \theta_c$  の  $\phi_{ch}$  依存性をみる。

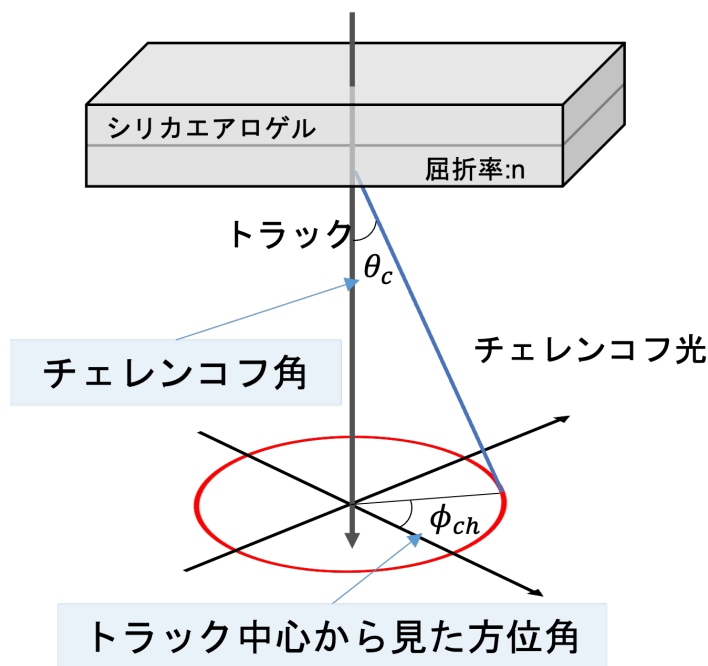


図 5.2: アライメントで使用する変数

### 5.1.1 領域分割

ずれを求める際には、図 5.3 のように ARICH 検出器を 36 領域に分割する。これは、ARICH 検出器のずれの方向を平易に表現し、可視化しやすくするためである。分割した領域での ARICH の  $n \cos \theta_c$  の  $\phi_{ch}$  依存性を定量的に求め、6 パラメータで全領域をフィットすることで ARICH 検出器全体のずれを算出する。なお、最終的に算出するずれの値は ARICH 検出器全体の値であり、ずれの補正も領域を分割せず ARICH 検出器全体で補正を行う。

具体的なずれの算出方法や補正の方法については 5.2 節で述べる。

また、使用する座標軸は 4 章の図 4.1 と同様である。

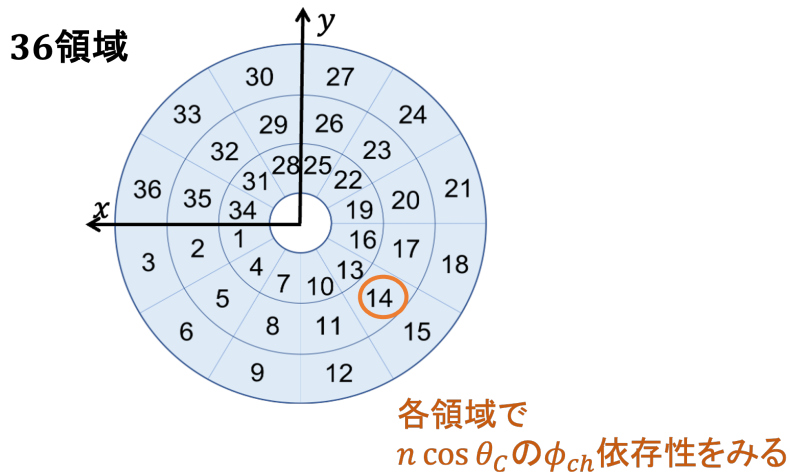


図 5.3: アライメントで使用する ARICH 検出器の分割領域

### 5.1.2 ずれを表す 6 パラメータ

本研究で用いる 6 パラメータとは、xyz 軸並進方向と xyz 軸周り回転方向の 6 種類のパラメータのことである。各パラメータの情報は、ARICH 検出器を幾何的に 6 方向の正負にそれぞれずらした計 12 種類のシミュレーションデータを作成し、取得する。シミュレーションデータは 4 章と同様にモンテカルロシミュレーションを使用するため、以降  $MC_{\pm param}$  ( $param = tx, ty, tz, rx, ry, rz$ ) と表す。 $param$  は 6 パラメータのことを指し、例として  $tx$  は並進 x 方向、 $rx$  は回転 x 方向を表す。

36 領域毎の  $MC_{\pm param}$  の正方向のずれ  $MC_{+param}$  について、矢印表示したものを図 5.4 に示す。矢印の長さがずれの大きさを、矢印の向きがずれの方向を表している。例として図 5.4 の左上の分布は、RICH を x 軸並進方向に +2mm 移動させた  $MC_{+tx}$  のずれの矢印表示である。

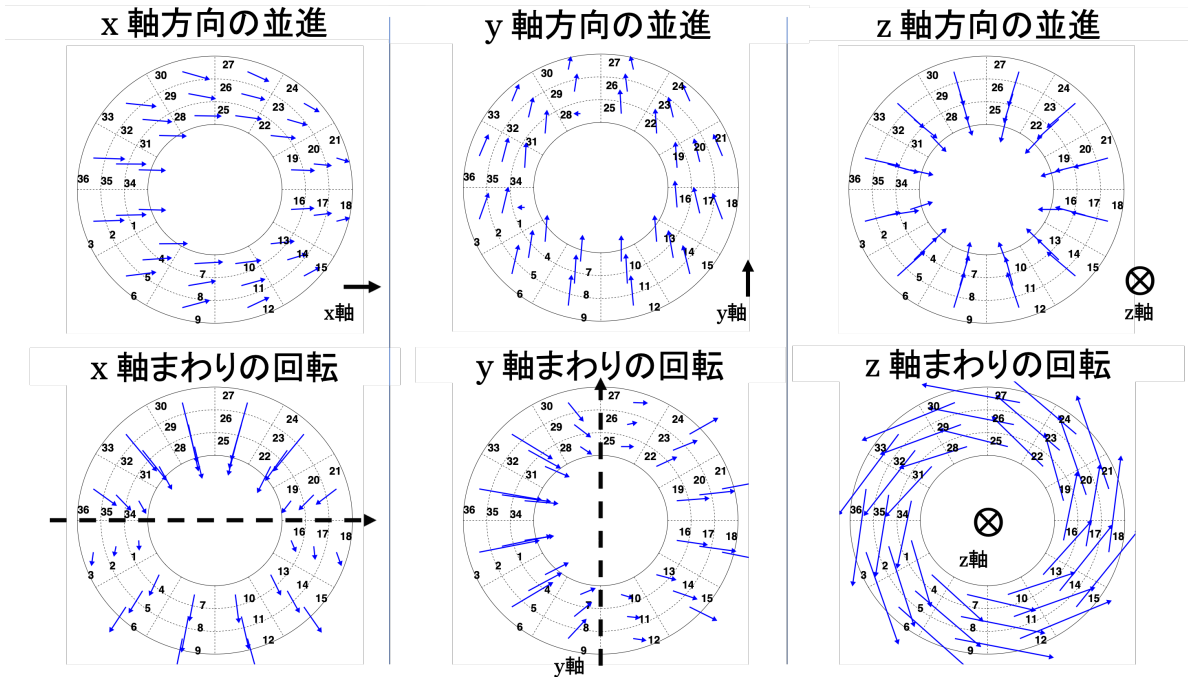


図 5.4: 36 領域毎の  $MC_{\pm param}$  の 6 パラメータのずれ (正方向) の矢印表示. 左上の図から、 $x, y$  並進方向のずれの大きさは  $+2\text{mm}$ 、 $z$  並進は  $+5\text{mm}$ 、 $x, y, z$  回転方向のずれの大きさは  $+0.2\text{deg}$  である.

## 5.2 アライメントの手順

アライメントの手順としては、以下の通りである。

1.  $n \cos \theta_c$  の  $\phi_{ch}$  依存性算出  
 ... 各分割領域で実験データと  $MC_{\pm param}$  の  $n \cos \theta_c$  の  $\phi_{ch}$  依存性を算出する。
2. ずれの算出 (フィッティング)  
 ...1 の結果を用いて、実験データに対して  $MC_{\pm param}$  でフィッティングをすることにより、ARICH 検出器全体のずれを 6 パラメータで表す。
3. ずれの補正  
 ... 算出したずれの値を元にずれを補正するプログラムを組み込み、 $\theta_c$  が再構成される際にずれが補正されるようにする。実際に実験データに対してずれが補正されているか確認する。

それぞれの手順の詳細を各小節で述べる。

### 5.2.1 $n \cos \theta_c$ の $\phi_{ch}$ 依存性算出

$n \cos \theta_c$  の  $\phi_{ch}$  依存性算出は、実験データと  $MC_{\pm param}$  共に同じ算出方法である。

まず、分割した 36 の各領域で  $\phi$  に対する  $n \cos \theta_c$  の分布を作成する。例として、図 5.3 に記載の領域 22 に

おける分布を図 5.5 に示す。横軸  $\phi_{ch}$ 、縦軸  $n \cos \theta_c$ 、色軸がイベント数を表している。

そして、図 5.5 の緑の領域のように、 $n \cos \theta_c$  の  $\phi_{ch}$  依存性を見るため  $\phi_{ch}$  を 13 分割し、スライスして色軸を  $y$  軸に射影することで、図 5.6 のように  $n \cos \theta_c$  の一次元ヒストグラムをそれぞれ作成する。作成したヒストグラムをガウス関数 + 一次関数でフィットし、最終的に得られた 13 個の  $n \cos \theta_c$  のフィット値を縦軸に、 $\phi_{ch}$  を横軸に取ることで、36 領域毎の  $n \cos \theta_c$  の  $\phi_{ch}$  依存性の分布を求める。(図 5.7)

MC $_{\pm param}$  の計 12 種類のデータに対して、この図 5.7 と同様の分布を 36 領域分全て作成し、各データ点 (36 × 13 個) の情報も保存しておく。

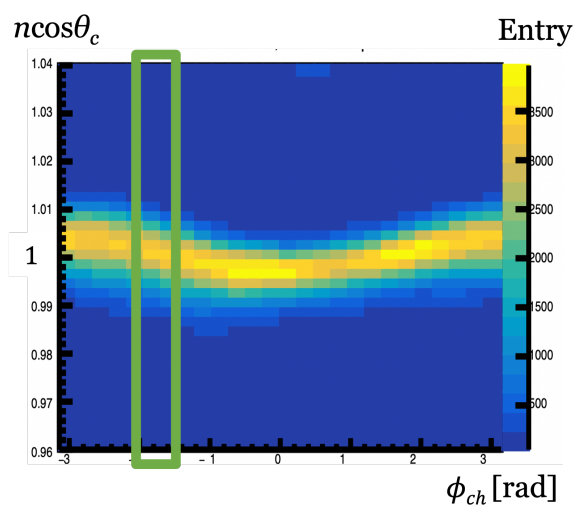


図 5.5: 36 領域中領域 22 における  $n \cos \theta_c$  vs  $\phi_{ch}$  と  $\phi_{ch}$  の 13 分割領域 (緑)

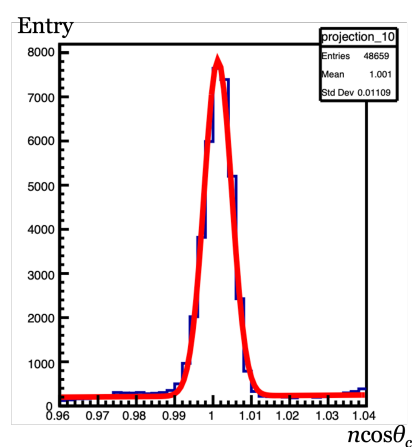


図 5.6:  $n \cos \theta_c$  のガウス関数と一次関数フィット

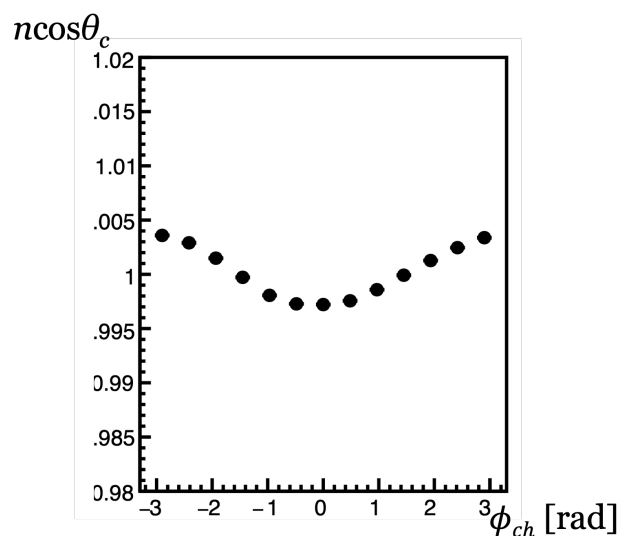


図 5.7: 36 領域中領域 22 における  $n \cos \theta_c$  vs  $\phi_{ch}$  依存性

式 3.1 より  $n \cos \theta_c = \frac{1}{\beta}$  であるが、 $\beta \simeq 1$  であるため、ARICH 検出器が正しい位置にある場合、図 5.7 はオフセットがほぼ 1 の直線の分布となる。

## 5.2.2 ずれの算出 (フィッティング)

5.2.1 節の結果を用いて、 $\phi_{ch}$ 13領域  $\times$  ARICH の分割領域36 の計 468 点の実験データの  $n \cos \theta_c$  に対して  $MC_{\pm param}$  の  $n \cos \theta_c$  でフィッティングすることにより、ARICH 検出器全体のずれを 6 パラメータで表す。

### MC のオフセット

ずれの算出手法について述べる前に MC のオフセットについて触れる。本来、MC は理想的な値をとるデータであるため、なにも ARICH 検出器をずらしていない MC は  $n \cos \theta_c$  に  $\phi_{ch}$  依存性はみられないはずである。しかし今回、なにも ARICH 検出器をずらしていない MC の  $n \cos \theta_c$  に  $\phi_{ch}$  依存性がみられ、ARICH 検出器がわずかにずれているような結果が得られた。このずれに関しては、ARICH 検出器の情報を再構成するソフトウェアのアップデートの影響と考えられるが、原因は不明である。この MC のずれの値を MC のオフセットと呼ぶ。

$\theta_c$  を再構成する際に MC の情報を用いるため、MC のオフセットは実験データや  $MC_{\pm param}$  問わず全ての  $n \cos \theta_c$  に含まれる。本研究では、MC のオフセットが何かしら必要なものである可能性を考慮して、MC のオフセットは補正せず、オフセット以外の  $n \cos \theta_c$  の  $\phi_{ch}$  依存性をずれと見做して補正する。

MC のオフセットについて、5.1.2 節と同様にずれの大きさを矢印表示したものを図 5.8 に載せる。

図 5.8 を見ると、全体的に並進  $-z$  方向にずれているように見られる。そのため、本研究で使用した 6 パラメータの  $MC_{\pm param}$  のうち  $MC_{\pm rz}$  のパラメータに関して、他のパラメータよりもずれを大きくすることで、ずれに対する  $n \cos \theta_c$  への影響をわかりやすくした。

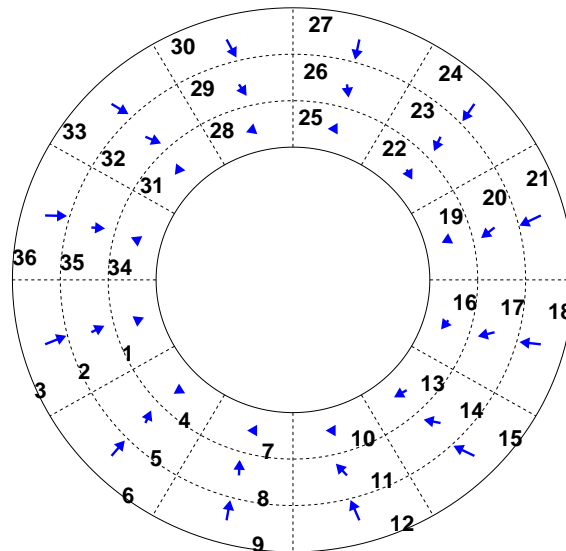


図 5.8: MC のオフセットの矢印表示

### ずれの算出手法

先行研究より、各パラメータに対して、ずれの大きさと  $n \cos \theta_c$  のずれが線形であることを仮定することができる。[13]

線形性を仮定すると、 $13 \times 36$  点の各データ点に対し、6 種類の各パラメータ ( $param = tx, ty, tz, rx, ry, rz$ ) について  $t_{param}$  の大きさだけずらした時に再構成される  $n \cos \theta_c$  の値を、下記のような  $f_{param}(t_{param})$  とその誤差  $\Delta f_{param}(t_{param})$  で表すことができる。

$$f_{param}(t_{param}) = \frac{f_+ - f_-}{2l} t_{param} + \frac{f_+ + f_-}{2} \quad (5.1)$$

$$\Delta f_{param}(t_{param}) = \sqrt{\left(\frac{1}{2} + \frac{t_{param}}{2l}\right)^2 \Delta f_+^2 + \left(\frac{1}{2} - \frac{t_{param}}{2l}\right)^2 \Delta f_-^2} \quad (5.2)$$

ここで、 $t_{param}$  はずれの大きさであり、 $f_+$ 、 $f_-$ 、 $l$  はそれぞれ  $MC_{\pm param}$  から求められた各点の  $n \cos \theta_c - 1$  の値と、 $MC_{\pm param}$  を作成する際にずらしたパラメータの大きさの絶対値である。

例として、ARICH が並進  $z$  方向にずれたとき ( $param = tz$ ) のあるデータ点における  $f_{tz}(t_{tz})$  とその誤差  $\Delta f_{tz}(t_{tz})$  を見てみる。図 5.9 は、縦軸が  $n \cos \theta_c - 1$ 、横軸が並進  $z$  方向のずれの大きさ  $t_{tz}$  を表している。

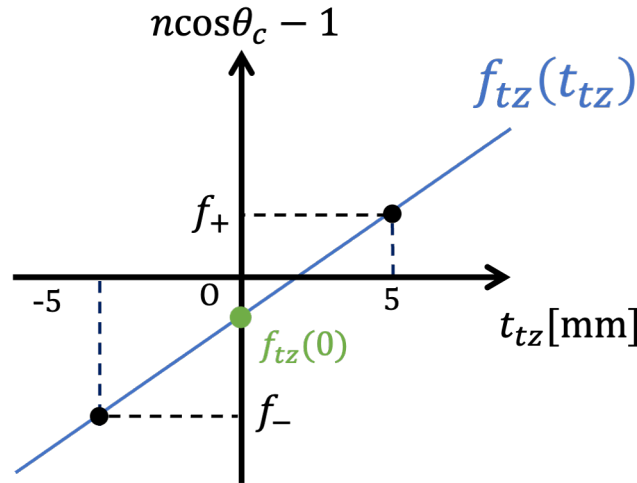


図 5.9: ある領域における並進  $z$  方向のずれを表す直線

$f_{tz}(t_{tz})$  と  $\Delta f_{tz}(t_{tz})$  は以下の式で求められる。

$$\begin{aligned} f_{tz}(t_{tz}) &= \frac{f_+ - f_-}{2l} t_{tz} + \frac{f_+ + f_-}{2} \\ &= \frac{f_+ - f_-}{10} t_{tz} + f_{tz}(0) \end{aligned} \quad (5.3)$$

$$\begin{aligned} \Delta f_{tz}(t_{tz}) &= \sqrt{\left(\frac{1}{2} + \frac{t_{tz}}{2l}\right)^2 \Delta f_+^2 + \left(\frac{1}{2} - \frac{t_{tz}}{2l}\right)^2 \Delta f_-^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{1}{2} + \frac{t_{tz}}{10}\right)^2 \Delta f_+^2 + \left(\frac{1}{2} - \frac{t_{tz}}{10}\right)^2 \Delta f_-^2} \end{aligned} \quad (5.4)$$

今回用意した  $MC_{\pm tz}$  は ARICH の位置を並進  $z$  方向に正負それぞれ 5mm ずらしてシミュレーションしたものであるため、 $l = 5\text{mm}$  である。 $f_{tz}(0)$  は  $MC_{\pm tz}$  のオフセットである。

このようにして求めた6パラメータの  $f_{param}(t_{param})$  を線型結合し、領域ごとのフィット値  $n \cos \theta_{fit}$  とその誤差  $\Delta n \cos \theta_{fit}$  を定める。

$$n \cos \theta_{fit} = t_0 + f_{tx} + f_{ty} + f_{tz} + f_{rx} + f_{ry} + f_{rz} - 6f_0 \quad (5.5)$$

$$\Delta n \cos \theta_{fit} = \sqrt{\Delta f_{tx}^2 + \Delta f_{ty}^2 + \Delta f_{tz}^2 + \Delta f_{rx}^2 + \Delta f_{ry}^2 + \Delta f_{rz}^2} \quad (5.6)$$

$f_0$  は ARICH のずれが0のときの  $MC_{\pm param}$  で見積もった  $n \cos \theta_c$  の1からのオフセットであり、各パラメータのオフセット  $f_{param}(0)$  の平均値である。 $t_0$  はフィッティングの際のオフセットであり、式3.1における  $\frac{1}{\beta}$  にあたる。つまり、5.2.1節で述べた通り、 $t_0$  は1に近い値を取る。

次に、各ずれの方向の直線と実験データとの値の差をとり、その値が最小化するようにする。(図5.10)

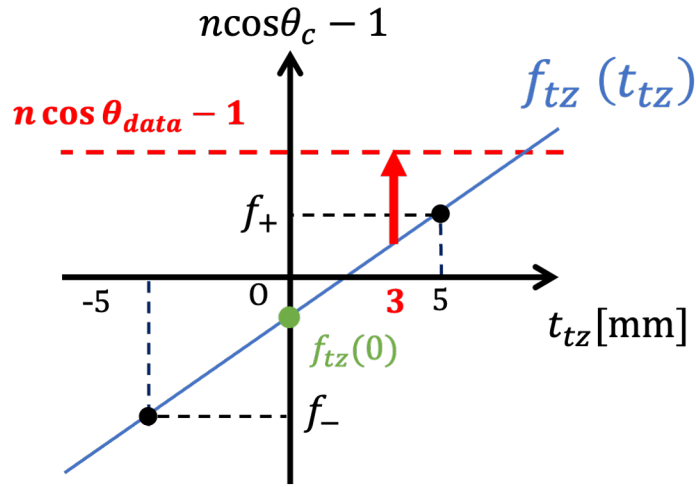


図 5.10: ある領域における並進 z 方向のずれを表す直線と実験データの値との差

最終的に、全ての領域で  $f_{param}(t_{param})$  と実験データの差を最小化するようにフィッティングする。得られた  $36 \times 13$  個の  $n \cos \theta_{data}$ 、 $\Delta n \cos \theta_{data}$  と、式 5.3、5.4 より求めた  $36 \times 13$  個の  $n \cos \theta_{fit}$ 、 $\Delta n \cos \theta_{fit}$  から、 $\chi^2$  を下記のように表す。

$$\begin{aligned} \chi^2(param, t_0) &= \sum_{36 \times 13 region} \frac{\{(n \cos \theta_{data} - f_0) - n \cos \theta_{fit}\}^2}{\Delta n \cos \theta_{data}^2 + \Delta n \cos \theta_{fit}^2} \\ &= \sum_{36 \times 13 region} \frac{n \cos \theta_{data} - \sum_{param} f_{param} - t_0 + 5f_0}{\Delta n \cos \theta_{data}^2 + \sum_{param} \Delta f_{param}^2} \end{aligned} \quad (5.7)$$

5.1.2節で述べた通り、実験データと  $MC_{\pm param}$  とともに MC のオフセット (=  $f_0$ ) を引いてずれを算出している。 $\chi^2$  が最小となる6パラメータが、今回の手法で算出する ARICH 全体のずれである。

### 5.2.3 ずれの補正

ずれの補正を行う際は、ずれを補正するプログラムを組み込み、 $\theta_c$  等の ARICH 検出器の情報が再構成される際にずれの補正を適応する。正しく補正されているか確認するために、再度 5.2.3 節のときと同様に 6 パ

ラメータのフィッティングを行わずに算出する。正しく補正できていた場合、5.1.2 節で述べた通り MC のオフセット以外のずれはみられない結果となる。

また、補正の際は 5.2.2 節、5.2.3 節で用いたずれを算出した実験データと全く同じ元データを使用する。

### 5.3 先行研究の課題と改良点

先行研究では、本研究と同じずれの算出方法でアライメントがなされてきた。[14] その中で、以下のような点が課題として挙げられていた。

- (1) 実験データのトラック位置に対して統計量の偏りが大きい  
→ 本研究での改良点を 5.4.2 節に示す。
- (2) 実験データのずれの補正が不完全であった  
→ 本研究での改良点を 5.4.4 節に示す。
- (3) アライメントの再現性が取れていなかった  
→ 本研究での改良点を 5.4.5 節に示す。
- (4) 新しいパラメータの導入の検討  
→ 本研究では未着手である。

(1) 統計量に関しては、ARICH 検出器を 36 領域に分割した際に、極端にトラックの少ない領域が見られるという問題があった。先行研究では、 $e^+ + e^- \rightarrow e^+ + e^-$  (Bhabha) 事象を用いたアライメント [13] と  $e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$  事象を用いたアライメント [14] がなされてきたが、どちらも同じような領域で統計量が少ない結果となった。(図 5.11) 電子と陽電子が衝突する角度によって生じるローレンツブーストの影響で、ARICH 検出器に入射する粒子の方向や位置が制限されるためだと考えられていた。

しかし今回、 $e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$  事象を用いて今までとは異なる選別条件を課すことで、先行研究と同程度のイベント数でも、ほぼ全ての領域で十分な統計量を得ることが可能となった。詳細は 5.4.2 節で述べる。



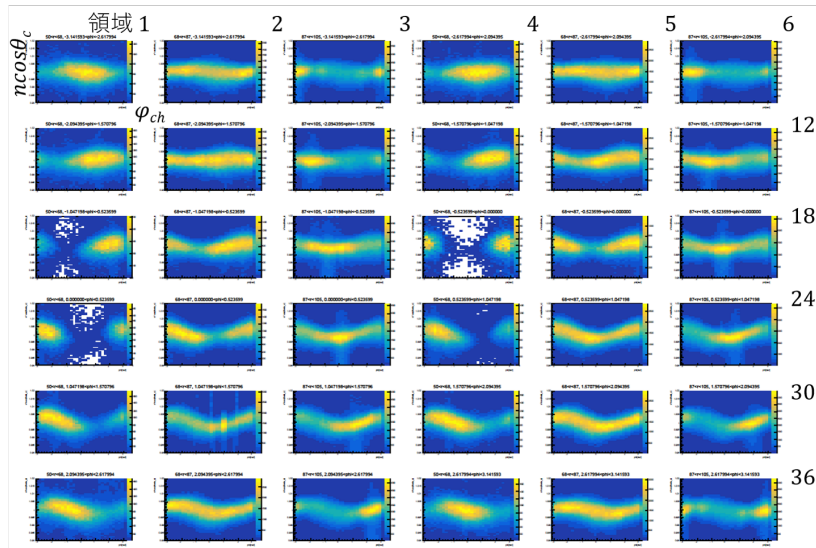


図 5.11: (先行研究) 実データにおいて 36 領域に分割された ARICH における  $n \cos \theta_c vs \phi_{ch}$  依存性 [14]. 白い箇所が統計がないところである。

(2) 実験データのずれの補正が不完全であることに関して、先行研究ではアライメント後の実験データに関してチェレンコフ角の角度分解能についての確認のみで、その他の補正後のずれのフィット結果は載せていなかった。本研究では実験データの補正後のフィット結果を算出し、アライメント前後の粒子識別性能を確認することでアライメントの正しさを評価する。フィット結果の詳細は 5.4.4 節で、粒子識別性能の詳細は 5.5 節と 6 章で述べる。

(3) アライメントの再現性が取れていなかったことに関して、先行研究では ARICH の実験データのずれを模擬したシミュレーションデータが正しく作成できておらず、実験データのずれを模擬してずらした値と、実験データのずれを模擬したシミュレーションデータのフィット値が大きく異なる結果となった。[14] 原因はフィットを行うスクリプトに間違いがあった、もしくは誤ったずれの値でシミュレーションデータを作成してしまったと考えられる。

そのため本研究では、先行研究で用いていた解析用のスクリプトを全て見直し改良を加え、全てのデータを取り直すことでずれの再現性を確認することができた。詳細は 5.4.5 節で述べる。

(4) 6 パラメータで表現できないずれに関して、新しいパラメータを導入したアライメントはまだ検討中であるが、その必要性について 5.4.4 節で触れる。

その他の主な改良点は以下の通りである。

- ミラー光子の排除等の選別条件を追加し、より精度良く  $e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$  を選別
- $MC_{\pm param}$  の各統計量を 10 倍以上、実験データの統計量を倍以上に増やし作成しなおすことで統計誤差を削減
- 最新の Belle II の解析環境に適応させ、最新の実験データに対応

## 5.4 アライメント結果

### 5.4.1 使用したデータ

使用したデータは2022年2月~6月に取得した実験データ (exp26,bucket36)、各パラメータのずれを模擬したシミュレーションデータの  $MC_{\pm param}$  の計13種類である。 $MC_{\pm param}$  の各パラメータのずれの値は、図5.4と同様に  $x,y$  並進方向  $\pm 2\text{mm}$ 、 $z$  並進方向  $\pm 5\text{mm}$ 、 $x,y,z$  回転方向  $\pm 0.2\text{deg}$  である。5.2.2節で述べた通り、MCのオフセットは  $f_{param}(0)$  の平均値  $f_0$  を用いて考慮するため、ARICHをずらしていないMCは使用しない。

また、本研究では先行研究と同様に  $e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$  事象を用いる。事象選別において、運動量やトラックのビーム軸からの距離等の条件は先行研究と揃えてあるが、今回最新の解析環境で作業を行うにあたり、ECLの情報を用いたBhabha事象のカットを課することが難しくなったため、代わりに電荷 $>0$ という条件を課すことでBhabha事象のカットをおこなった。これは、加速器の電子ビームおよび陽電子ビームの進行方向の影響により、ARICH検出器に入射するほぼ全てのBhabha事象が $e^-$ であるためである。ただしこの条件により $\mu^-$ のトラックも排除されてしまい、統計量は約半分になってしまうが、 $\mu^+$ と $\mu^-$ のどちらを用いてもアライメントに大きく影響しないということが先行研究でわかっている。

すべてのデータに同じカットを課し、それぞれのカット後のイベント数は実験データが約46万イベント、 $MC_{\pm param}$  がそれぞれ約27万イベントである。

$MC_{\pm param}$  のずれの矢印表示について図5.4に記載したが、実験データの矢印表示についても図5.12に示す。

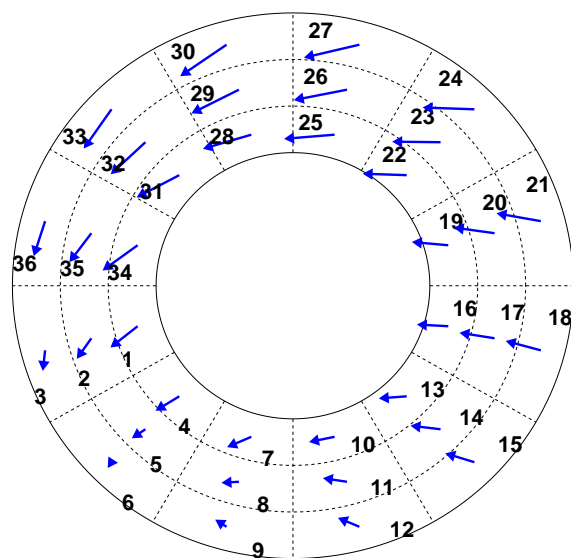


図 5.12: 実験データ (exp26,bucket36) のずれの矢印表示

## 5.4.2 $n \cos \theta_c$ の $\phi_{ch}$ 依存性算出

実験データの  $n \cos \theta_c$  の  $\phi_{ch}$  依存性の色軸が統計量の分布を 36 領域すべて載せた図 5.13 と、図 5.13 を各領域で 13 個のデータ点に分けた結果の分布が図 5.14 である。

図 5.13 は先行研究の図 5.11 と比較すると、色のない箇所が減り、統計量の偏りが少なくなっていることがわかる。依然として統計のない箇所が見られるのは、電荷  $> 0$  という条件を課すことによって  $\mu^-$  がカットされた影響だと考えられる。

また、ずれの算出を行うために、図 5.14 と同様の分布を  $MC_{\pm param}$  の計 12 種類作成した。

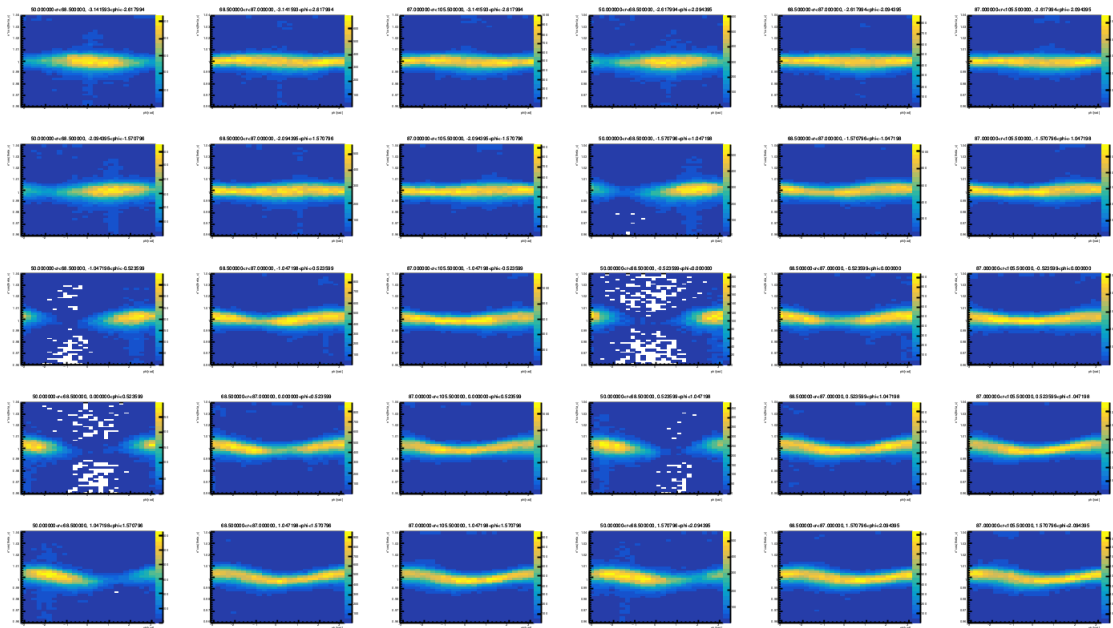


図 5.13: 実験データ (exp26,bucket36) の 36 領域の  $n \cos \theta_c vs \phi_{ch}$  (13 分割前)

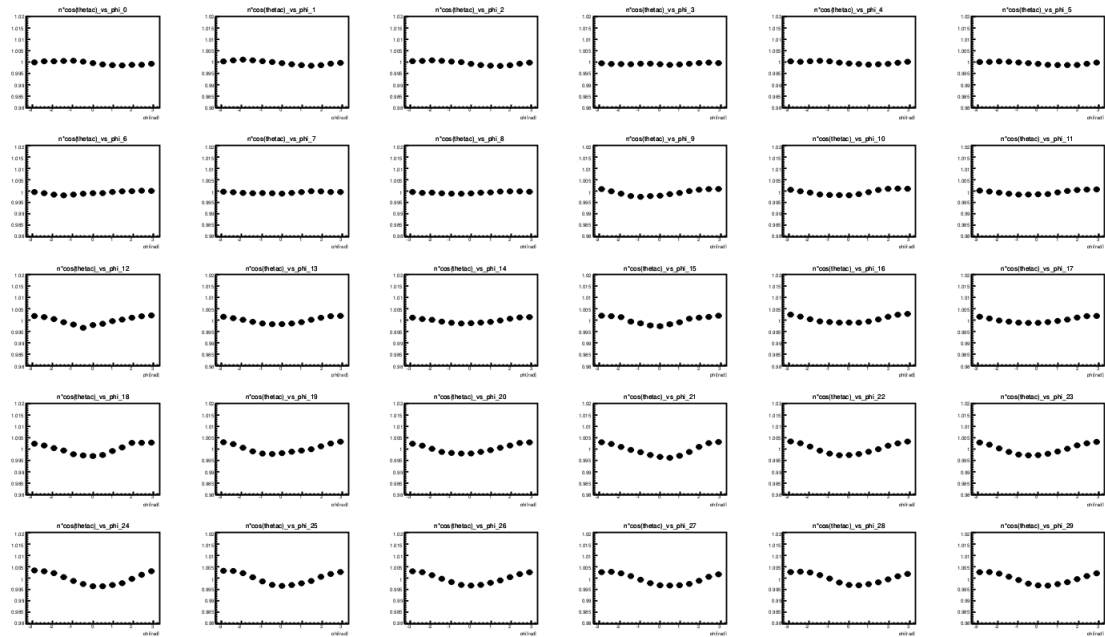


図 5.14: 実験データ (exp26,bucket36) の 36 領域の  $n \cos \theta_c$  vs  $\phi_{ch}$

### 5.4.3 ずれの算出 (フィッティング)

図 5.14 に対して、フィットをおこなった結果が図 5.15 である。黒い点が実験データのデータ点であり、赤い点がフィット結果の値である。

フィット結果の値は表 5.1 に示す。

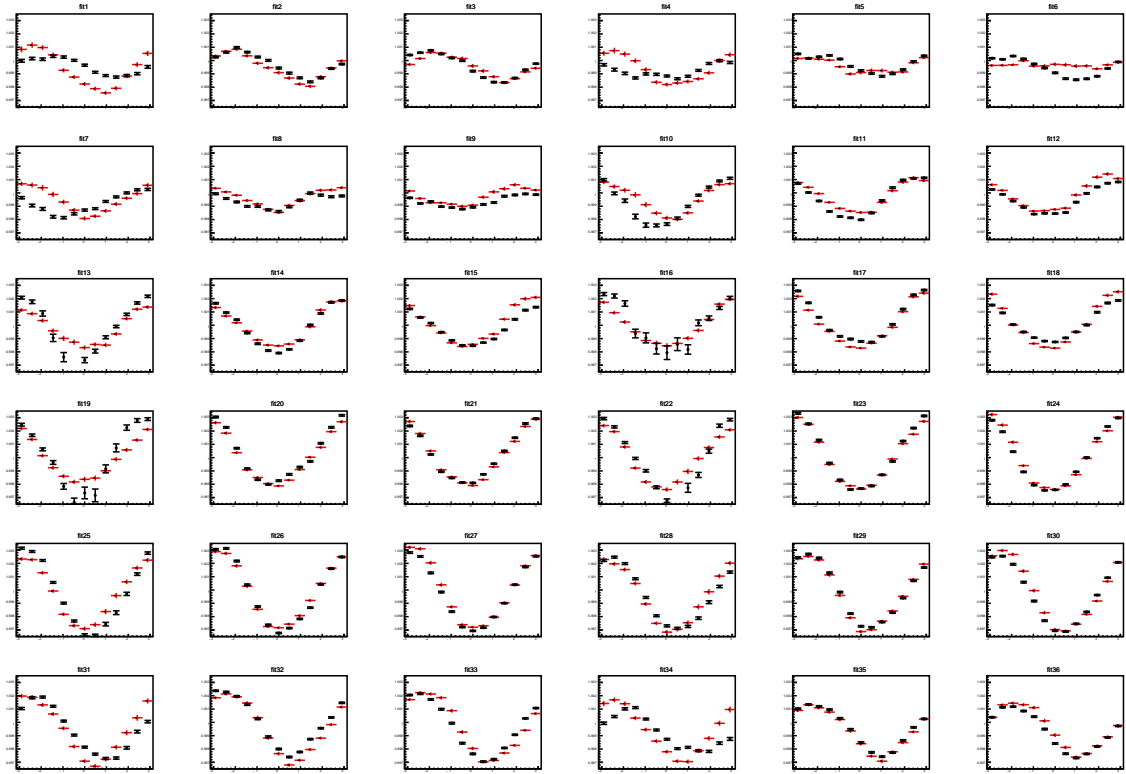


図 5.15: 実験データ (exp26,bucket36) の 36 領域の  $n \cos \theta_c vs \phi_{ch}$  フィット結果

表 5.1: 実験データ (exp26,bucket36) の 36 領域の  $n \cos \theta_c vs \phi_{ch}$  フィット結果の値

ずれのパラメータ	ずれの値
x 並進 $t_{tx}$ [mm]	$-1.4078 \pm 0.0115$
y 並進 $t_{ty}$ [mm]	$-0.3633 \pm 0.0117$
z 並進 $t_{tz}$ [mm]	$-0.3070 \pm 0.0171$
x 回転 $t_{rx}$ [deg]	$-0.0019 \pm 0.0025$
y 回転 $t_{ry}$ [deg]	$0.0429 \pm 0.0020$
z 回転 $t_{rz}$ [deg]	$0.0503 \pm 0.0004$
オフセット $t_0$	$1.0000 \pm 0.0000$
$\chi^2/ndf = 11.5237$	

x 並進方向のずれが他のパラメータと比較して大きい結果となったが、ARICH 検出器の構造上可能なずれの大きさは並進方向 2mm、回転方向 0.09deg 程度 [13] であるため、現実的なずれの範囲内と言える。また、 $\chi^2/ndf = 11.5237$  という結果になったが、これは先行研究 ( $\chi^2/ndf = 21.2694$ [14]) よりも良い精度でフィッティングができていていることを示す。

#### 5.4.4 ずれの補正

5.4.3 節で算出したずれの値（表 5.1）を元に、同じ実験データに補正を行う。

補正後の実験データに対して、再度フィットをおこなった結果を図 5.16、フィット結果の値を表 5.2 に示す。

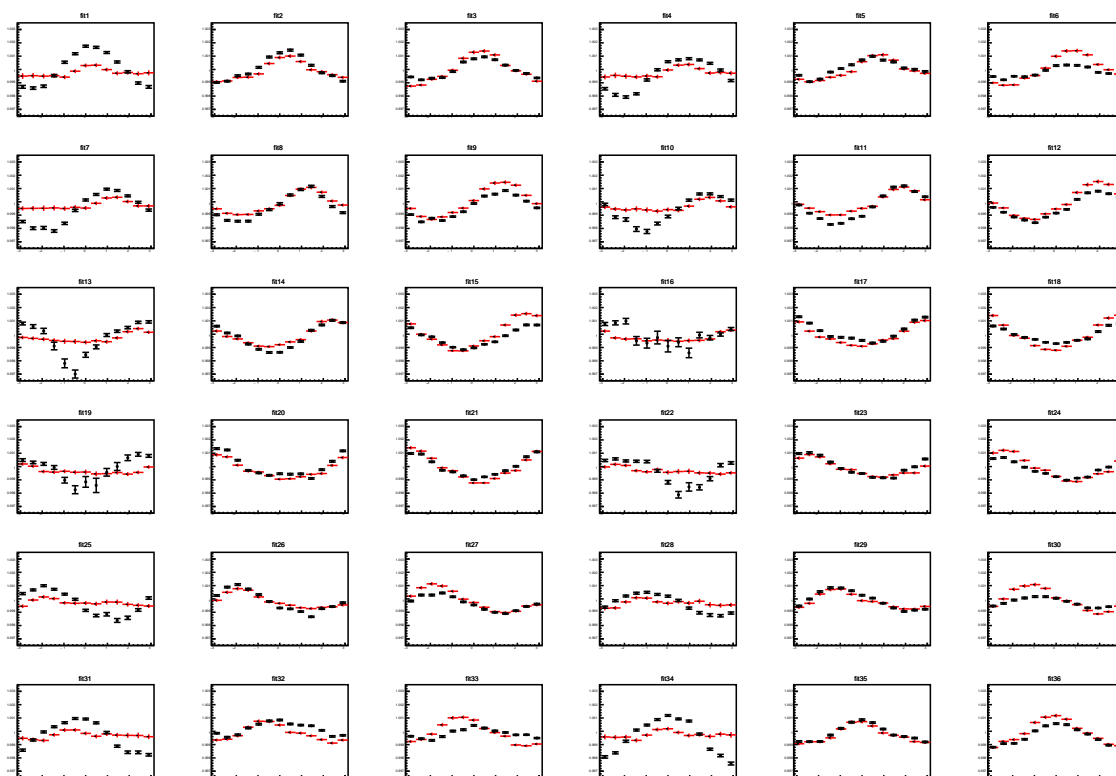


図 5.16: ずれを補正した実験データ (exp26,bucket36) の 36 領域の  $n \cos \theta_c vs \phi_{ch}$  フィット結果

表 5.2: ずれを補正した実験データ (exp26,bucket36) の 36 領域の  $n \cos \theta_c vs \phi_{ch}$  フィット結果の値

ずれのパラメータ	ずれの値
x 並進 $t_{tx}$ [mm]	$0.0291 \pm 0.0111$
y 並進 $t_{ty}$ [mm]	$0.0125 \pm 0.0113$
z 並進 $t_{tz}$ [mm]	$-0.0100 \pm 0.0165$
x 回転 $t_{rx}$ [deg]	$0.0020 \pm 0.0024$
y 回転 $t_{ry}$ [deg]	$-0.0063 \pm 0.0020$
z 回転 $t_{rz}$ [deg]	$0.0002 \pm 0.0004$
オフセット $t_0$	$1.0000 \pm 0.0000$
$\chi^2/ndf = 12.4561$	

表 5.2 のずれの値が誤差の範囲内で 0 に収まれば、正しく補正できているといえる。x 並進方向のずれがわずかに補正しきれていないが、ほとんどのパラメータで誤差の範囲内に補正できている。

また、領域 13 や領域 22 など、ARICH 検出器の内側の領域のずれが残っていることがわかるが、このずれを補正するためには 6 パラメータ以外の新たなパラメータの導入など、フィットの精度を上げる必要がある。

#### 5.4.5 アライメントの再現性の確認

アライメントに再現性があるか確認するために、算出したずれの値 (表 5.1) の通り ARICH 検出器を幾何的にずらしたシミュレーションデータを作成し、ずれの補正まで行う。作成したシミュレーションデータのカット後の統計量は 34 万イベント程度である。

まず、ずれの値の算出に再現性があるか確認する。

算出したずれの値 (表 5.1) の通り ARICH 検出器を幾何的にずらしたシミュレーションデータに対してフィッティングを行い、ずれを算出した結果が図 5.17、フィット結果の値が表 5.4 である。また、表 5.1 と同じ値であるが、ずらした 6 パラメータの値を表 5.3 に示す。

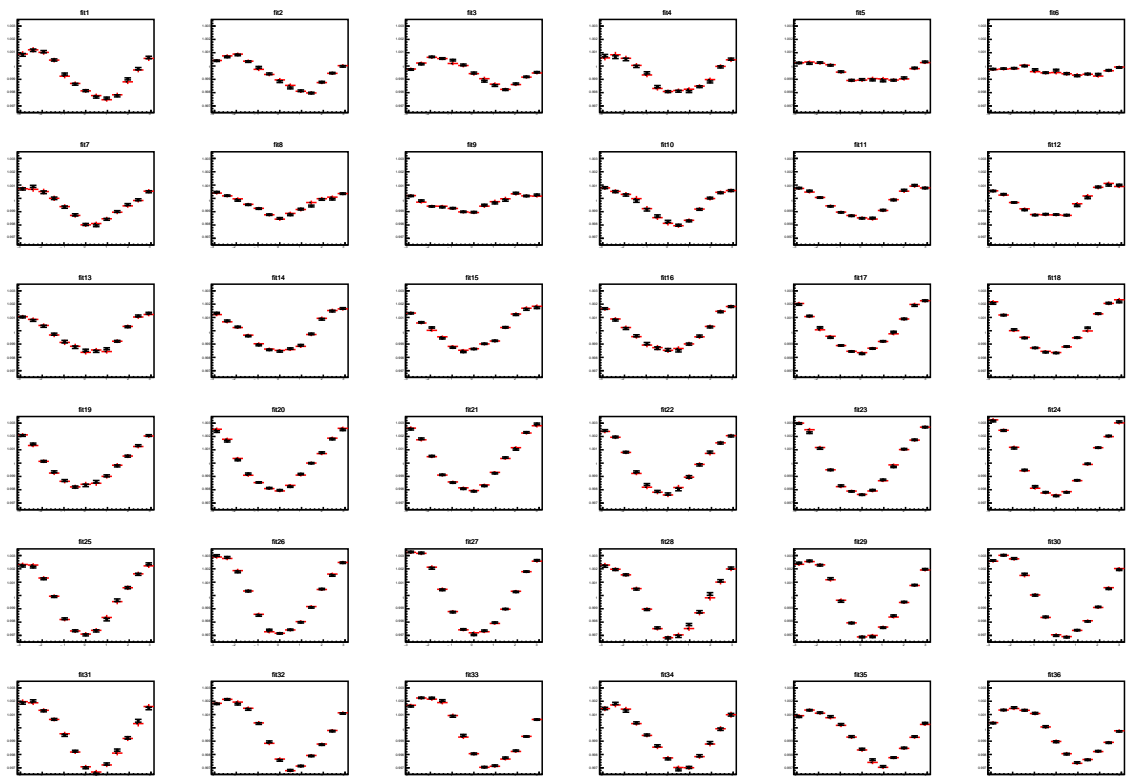


図 5.17: 実験データのずれを模擬した MC の 36 領域の  $n \cos \theta_c$  vs  $\phi_{ch}$  フィット結果

ここで、 $\chi^2/ndf$  が 1 を下回っているのは、統計量が少なく誤差が大きくなってしまっているためだと考えられる。

表 5.4 のずれの値が誤差の範囲内で表 5.3 の値と一致すれば、フィッティング (ずれの算出) に再現性があるといえるが、全てのパラメータで誤差の範囲内にあることがわかる。よって、フィッティングの再現性が確認

ずれのパラメータ	ずらした値
x 並進 $t_{tx}$ [mm]	-1.4078
y 並進 $t_{ty}$ [mm]	-0.3633
z 並進 $t_{tz}$ [mm]	-0.3070
x 回転 $t_{rx}$ [deg]	-0.0019
y 回転 $t_{ry}$ [deg]	0.0429
z 回転 $t_{rz}$ [deg]	0.0503

表 5.3: ずらした 6 パラメータの値 (= 表 5.1 のフィット結果の値)

ずれのパラメータ	ずれの値
x 並進 $t_{tx}$ [mm]	$-1.4059 \pm 0.0114$
y 並進 $t_{ty}$ [mm]	$-0.3568 \pm 0.0114$
z 並進 $t_{tz}$ [mm]	$-0.4756 \pm 0.0171$
x 回転 $t_{rx}$ [deg]	$0.0153 \pm 0.0025$
y 回転 $t_{ry}$ [deg]	$0.0435 \pm 0.0020$
z 回転 $t_{rz}$ [deg]	$0.0503 \pm 0.0004$
オフセット $t_0$	$1.0000 \pm 0.0000$
$\chi^2/ndf = 0.339324$	

表 5.4: 実験データのずれを模擬した MC の 36 領域の  $n \cos \theta_c vs \phi_{ch}$  フィット結果の値

できた。

次に、算出したずれの値 (表 5.4) でずれを補正し、再度 6 パラメータのフィッティングを行いずれを算出することで、ずれの補正が正しく機能するか確認を行う。5.4.4 節の実験データの時と同様、正しく補正できていた場合、MC のオフセット以外のずれはみられない結果となる。

ずれを補正したデータのフィット結果を図 5.18、フィット結果の値を表 5.5 に示す。



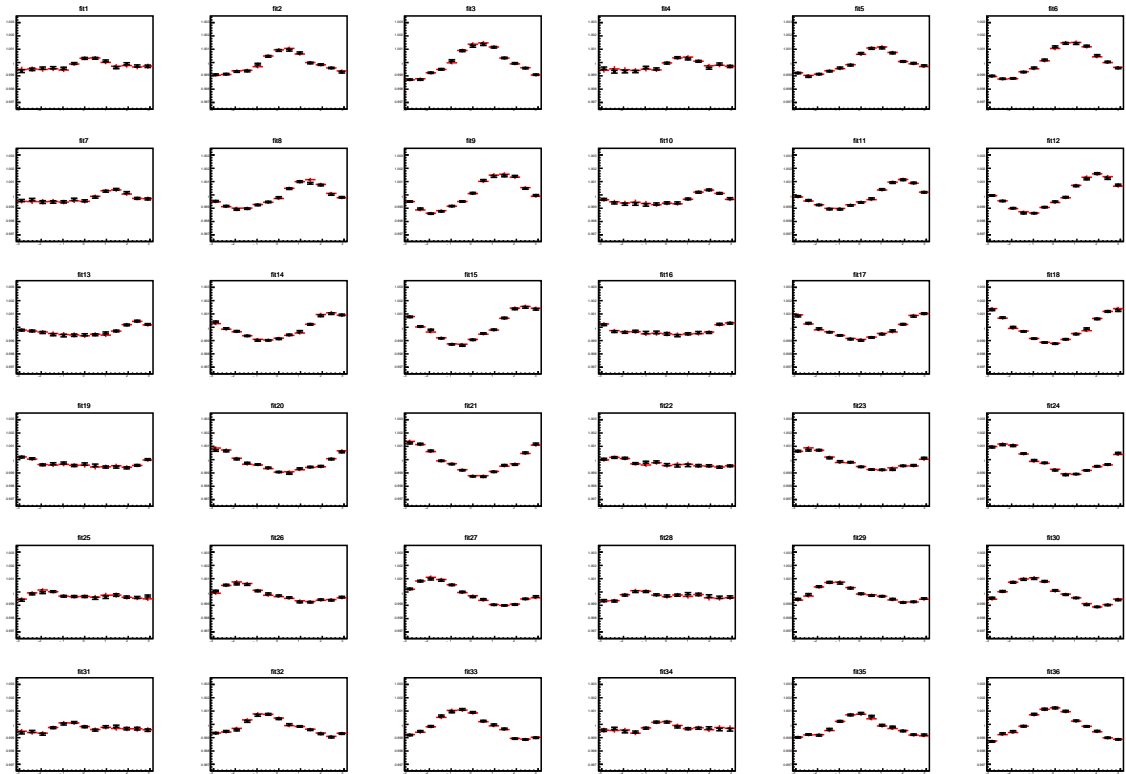


図 5.18: 実験データのずれを補正した MC の 36 領域の  $n \cos \theta_c$  vs  $\phi_{ch}$  フィット結果

表 5.5: 実験データのずれを補正した MC の 36 領域の  $n \cos \theta_c$  vs  $\phi_{ch}$  フィット結果の値

ずれのパラメータ	ずれの値
x 並進 $t_{tx}$ [mm]	$-0.0010 \pm 0.0110$
y 並進 $t_{ty}$ [mm]	$0.0010 \pm 0.0110$
z 並進 $t_{tz}$ [mm]	$0.0324 \pm 0.0164$
x 回転 $t_{rx}$ [deg]	$-0.0027 \pm 0.0024$
y 回転 $t_{ry}$ [deg]	$0.0002 \pm 0.0020$
z 回転 $t_{rz}$ [deg]	$-0.0001 \pm 0.0004$
オフセット $t_0$	$1.0000 \pm 0.0000$
$\chi^2/ndf = 0.272262$	

表 5.5 のずれの値が誤差の範囲内で 0 に収まれば、正しく補正できているといえる。実験データと同様、概ね補正できているといえる。

また、図 5.18 にみられる分布は補正しきれないずれではなく、MC のオフセットである。図 5.18 に対して MC のオフセットを差し引いた結果を図 5.19 に示す。

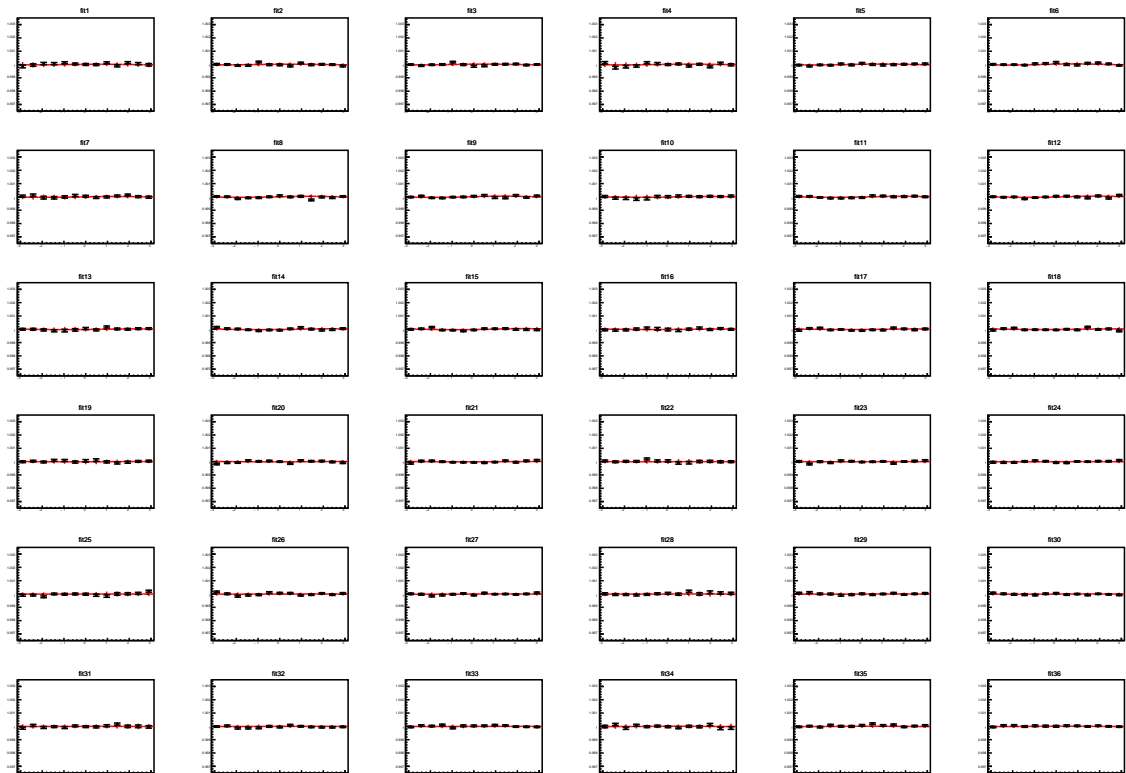


図 5.19: 実験データのずれを補正した MC の 36 領域の  $n \cos \theta_c vs \phi_{ch}$  フィット結果 (MC のオフセットを差し引いたもの)

## 5.5 チェレンコフ角度分解能への影響

4.4 節と同様に、実験データのアライメント前後のチェレンコフ角度分布を見ることで、アライメントによる粒子識別性能  $S$  への影響を確認する。使用する実験データは 5.4.1 節と同じデータ ( $e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$  事象) である。

アライメント前の実験データのチェレンコフ角度分布を図 5.20 に、アライメント後の実験データのチェレンコフ角度分布を図 5.21 に示す。

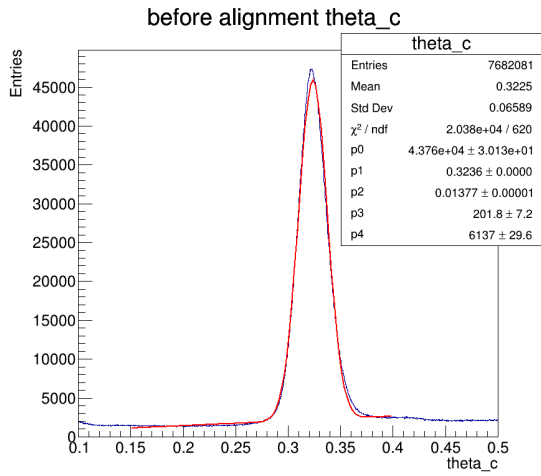


図 5.20: アライメント前の実験データのチェレンコフ角度分布

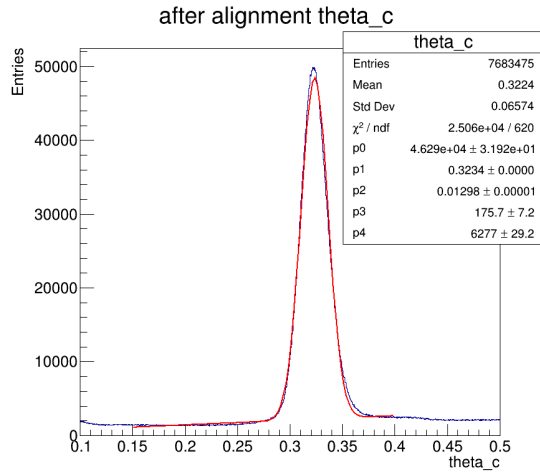


図 5.21: アライメント後の実験データのチェレンコフ角度分布

両者ともガウス関数と一次関数でフィッティングを行ない、それぞれの図の統計ボックスに記載の p2 が  $\sigma_{\theta_c}$  である。つまり、4.4 節と同様に、検出光子数やエアロゲルの屈折率を一定とみなした時、運動量 4GeV/c のときの  $S$  は、アライメント前の 5.55 からアライメント後は 5.89 と、 $0.34\sigma$  向上すると見積もられる。

今回はアライメント前後の  $e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$  事象のチェレンコフ角度分解能を比較することで、粒子識別性能への影響を確かめた。より現実的な粒子識別性能の差を比較するために、6 章ではシミュレーションデータを用いて  $K$  粒子や  $\pi$  粒子の識別を行い、粒子識別性能への影響を見る。

## 第 6 章

# ARICH 検出器のずれが及ぼす粒子識別性能への影響

5 章では、実際の実験データを用いてずれを算出し、ソフトウェア上でその補正をおこなった。(=アライメント)

本章では、シミュレーションデータを用いて、アライメント前後の ARICH 検出器の  $K/\pi$  粒子識別性能の影響を見ることで、5 章で算出した実験データのずれの値 (表 5.1) による粒子識別性能への影響を見積もる。具体的には、ARICH 検出器を算出した実験データのずれの値 (表 5.1) にずらした、実験データに近い事象のシミュレーションデータを作成し、アライメントを適応していないデータと適応したデータに分けて  $K/\pi$  粒子識別性能について確認する。

### 6.1 検出効率と誤識別率

3.1 節で述べたように、ARICH 検出器に入射してきた各トラックには、チェレンコフ角  $\theta_c$  の再構成と同時に、そのトラックの  $K$  粒子らしさや  $\pi$  粒子らしさを表す尤度の値  $L_K$  や  $L_\pi$  (式 3.3) が与えられる。ARICH 検出器では基本的に、 $L_K$ 、 $L_\pi$  や、対数をとった  $\log(L_K)$ 、 $\log(L_\pi)$  を用いて粒子識別がなされる。

本研究では、 $K$  と  $\pi$  の尤度比  $R_{K/\pi}$  もしくは  $R_{\pi/K}$  を用いて粒子識別を行う。 $R_{K/\pi}$  もしくは  $R_{\pi/K}$  とその条件は以下の式で定義する。

$$R_{K/\pi} = \frac{L_K}{L_K + L_\pi} \quad (6.1)$$

$$R_{\pi/K} = \frac{L_\pi}{L_K + L_\pi} (= 1 - R_{K/\pi}) \quad (6.2)$$

この式から、 $R_{K/\pi}$  が高いほど  $\pi$  ではなく  $K$  らしい粒子であり、 $R_{\pi/K}$  が高いほど  $K$  ではなく  $\pi$  らしい粒子であることがわかる。[12]

粒子識別性能の評価では、検出効率と誤識別率という値をみる。検出効率は、粒子を正しく識別できた割合のことを指し、誤識別率は粒子を誤って識別した割合のことを指す。つまり、検出効率が高く、誤識別率が低いほど粒子識別性能が良いといえる。

例えば  $K$  検出効率  $K_{eff}$  と  $\pi$  誤識別率  $\pi_{fake}$  は、 $R_{K/\pi}$  を用いて以下の式で表すことができる。

$$K_{eff} = \frac{K \text{ tracks (if } R_{K/\pi} > R)}{\text{all } K \text{ tracks}} (= \frac{K \text{ と識別されたトラック数}}{\text{全 } K \text{ トラック数}}) \quad (6.3)$$

$$\pi_{fake} = \frac{\pi \text{ tracks (if } R_{K/\pi} > R)}{\text{all } \pi \text{ tracks}} (= \frac{\pi \text{ と誤識別されたトラック数}}{\text{全 } \pi \text{ トラック数}}) \quad (6.4)$$

$R$  は粒子識別の閾値となる値であり、ある粒子に対して  $R_{K/\pi} > R$  のときは  $K$  粒子、 $R_{K/\pi} < 1 - R$  のときは  $\pi$  と識別される。

同様に、 $\pi$  検出効率  $\pi_{eff}$  と  $K$  誤識別率  $K_{fake}$  は、 $R_{\pi/K}$  を用いて以下の式で表すことができる。

$$\pi_{eff} = \frac{\pi \text{ tracks (if } R_{\pi/K} > R)}{\text{all } \pi \text{ tracks}} (= \frac{\pi \text{ と識別されたトラック数}}{\text{全 } \pi \text{ トラック数}}) \quad (6.5)$$

$$K_{fake} = \frac{K \text{ tracks (if } R_{\pi/K} > R)}{\text{all } K \text{ tracks}} (= \frac{K \text{ と誤識別されたトラック数}}{\text{全 } K \text{ トラック数}}) \quad (6.6)$$

なお、検出効率や誤識別率の比較は  $\pi$  もしくは  $K$  の全トラック数がわかっている必要があるため、トラックの真の情報取得できるシミュレーションデータや、トラック数を数えることのできる特殊な崩壊過程のみ行うことができる。

本研究では、 $R = 0.6$  とし、 $R_{K/\pi} > 0.6$  のときの  $K$  検出効率と  $\pi$  誤識別率と、 $R = 0.1$  とした  $R_{\pi/K} > 0.1$  のときの  $\pi$  検出効率と  $K$  誤識別率についてそれぞれ比較する。[12]

## 6.2 粒子識別性能の評価

ARICH 検出器の要求性能である 0.5~4.0GeV における検出効率や誤識別率の比較をすることで、 $K/\pi$  識別性能差を確かめる。

使用したシミュレーションデータは、電子陽電子対がチャームクォーク反チャームクォーク対になりハドロン化する事象 ( $e^+e^- \rightarrow c\bar{c}$ ) を用いる。この事象は、 $B\bar{B}$  以外のハドロン生成事象の一つであり、 $B$  中間子の稀崩壊事象を解析する際の背景事象の一つでもある。 $B$  中間子のシミュレーションを使用しなかった理由は、 $B$  中間子の稀崩壊で生成され 4.0GeV 付近の運動量を持つ  $K$  や  $\pi$  がほとんどみられないのに対し、その背景事象となる  $e^+e^- \rightarrow c\bar{c}$  のシミュレーションデータには高運動量の  $K$ 、 $\pi$  が潤沢に含まれるためである。

式 3.1 と図 3.5 からわかるように、 $K$  と  $\pi$  のチェレンコフ角は運動量の値でそれぞれピークの位置が変わる。そのため今回は 0.4~0.5GeV の間隔で運動量ごとに検出効率と誤識別率を比較する。

比較するシミュレーションデータは両者とも ARICH 検出器を実験データのずれの値 (表 5.1) にずらしたもので、ずれを補正していないデータ (=  $MC_{notalign}$ ) とずれを補正したデータ (=  $MC_{align}$ ) の二つである。

また、ARICH をずらしていない MC も用意し、アライメント後の粒子識別性能が理想的な位置の MC の粒子識別性能に近い値になるかどうかについても確認を行う。

なお、各データの統計量は  $K$  が約 50 万トラック、 $\pi$  が約 170 万トラック程度になるように揃えてある。

### 6.2.1 結果

$R_{K/\pi} > 0.6$  の各運動量ごとの  $K_{eff}$  と  $\pi_{fake}$  の結果をそれぞれ図 6.1 と図 6.2 に示す。

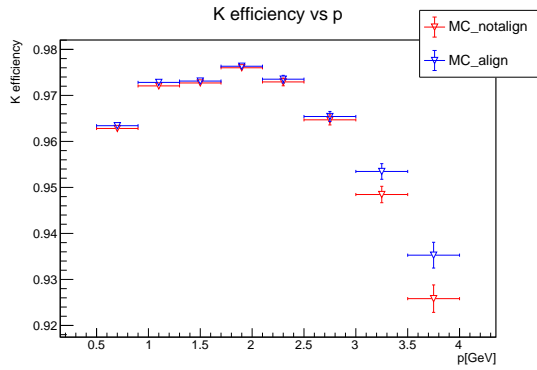


図 6.1: アライメント前後の MC の  $K_{eff}$  vs p ( $R_{K/\pi} > 0.6$ )

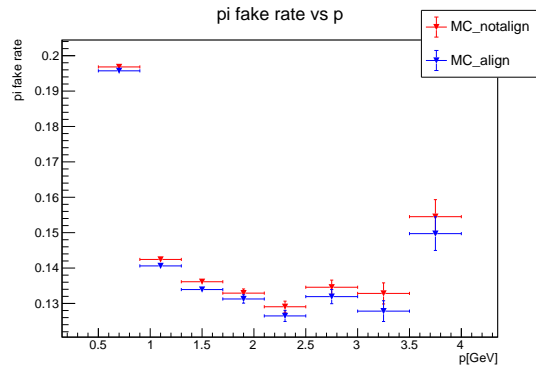


図 6.2: アライメント前後の MC の  $\pi_{fake}$  vs p ( $R_{K/\pi} > 0.6$ )

両者とも、赤線がずれの補正をしていない、ARICH 検出器がずれたままデータを再構成した  $MC_{notalign}$  であり、青線がずれの補正をおこなってデータを再構成した  $MC_{align}$  である。

全ての運動量領域において、アライメント後の  $MC_{align}$  の方がアライメント前の  $MC_{notalign}$  よりも  $K_{eff}$  が高く  $\pi_{fake}$  が低いことがわかる。アライメント前後で元データは同じであるため、アライメント後の方が粒子識別性能が有意に上がっているといえる。

同様に、 $R_{\pi/K} > 0.1$  の  $\pi_{eff}$  と  $K_{fake}$  の結果をそれぞれ図 6.3 と図 6.5 に示す。

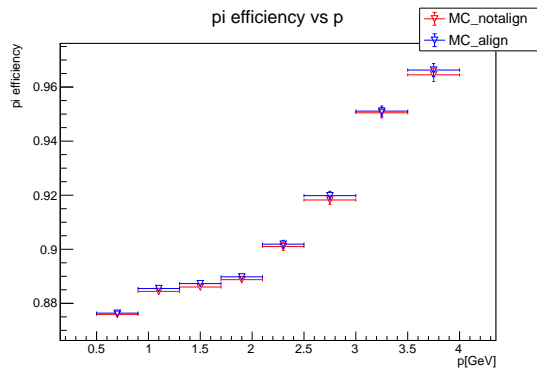


図 6.3: アライメント前後の MC の  $\pi_{eff}$  vs p ( $R_{\pi/K} > 0.1$ )

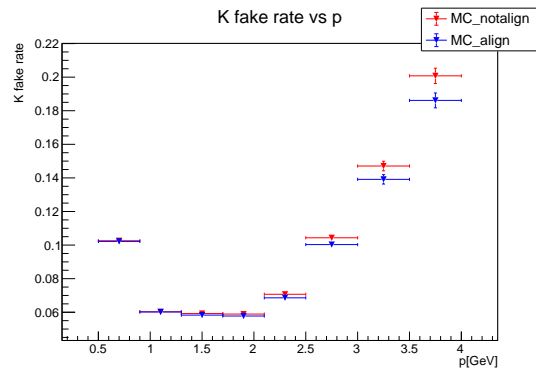


図 6.4: アライメント前後の MC の  $K_{fake}$  vs p ( $R_{\pi/K} > 0.1$ )

$\pi_{eff}$  や  $K_{fake}$  も、 $K_{eff}$  と  $\pi_{fake}$  と同様、ほぼ全ての運動量領域でアライメント後の方が性能が良いことがわかる。

次に、ARICH 検出器をずらしていない通常の MC と、先ほど用いたアライメント補正後の  $MC_{align}$  の結果を比較し、補正後のデータが MC と同じような性能になるか確認する。同様に、 $R_{K/\pi} > 0.6$  のときの  $K_{eff}$  と  $\pi_{fake}$  の結果と、 $R_{\pi/K} > 0.1$  のときの  $\pi_{eff}$  と  $K_{fake}$  の結果についてそれぞれ図 6.5、6.6 と図 6.7、6.8 に示す。

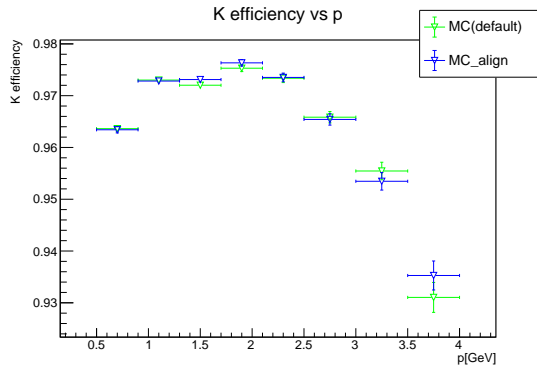


図 6.5: 通常の MC とアライメント後の MC の  $K_{eff}$  vs  $p$  ( $R_{K/\pi} > 0.6$ )

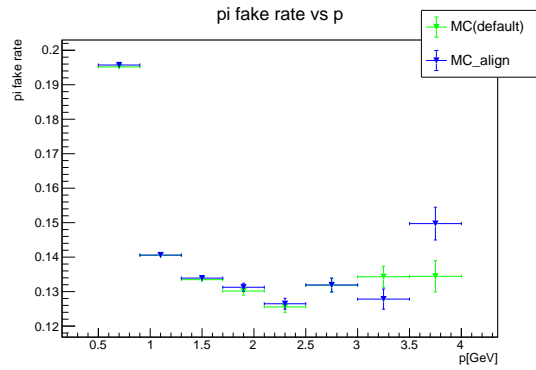


図 6.6: 通常の MC とアライメント後の MC の  $\pi_{fake}$  vs  $p$  ( $R_{K/\pi} > 0.6$ )

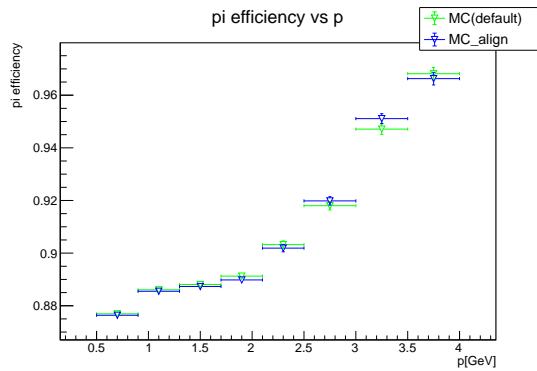


図 6.7: 通常の MC とアライメント後の MC の  $\pi_{eff}$  vs  $p$  ( $R_{\pi/K} > 0.1$ )

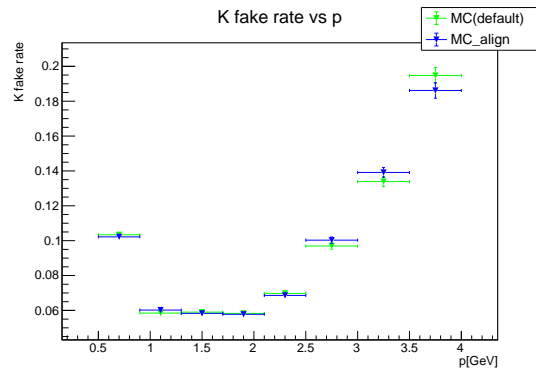


図 6.8: 通常の MC とアライメント後の MC の  $K_{fake}$  vs  $p$  ( $R_{\pi/K} > 0.1$ )

MC と  $MC_{align}$  の比較は、 $MC_{notalign}$  と  $MC_{align}$  の比較の時とは異なり元データが一緒ではないが、全ての運動量領域における  $K_{eff}$ 、 $\pi_{fake}$ 、 $\pi_{eff}$ 、 $K_{fake}$  の MC と  $MC_{align}$  は誤差の範囲内で一致しており、概ね正しくずれの補正ができていることが確認できる。中心値が若干異なる領域においても、検出効率が高い（低い）方向に異なる場合は、誤識別率も低い（高い）方向に異なっており、粒子識別能力には違いがないとみられる。

次に、 $R_{K/\pi}$  もしくは  $R_{\pi/K}$  を固定せずに変数とし、 $\pi_{fake}$  もしくは  $K_{fake}$  がそれぞれ 10% 程度の値を取るような  $K_{eff}$  もしくは  $\pi_{eff}$  について、運動量毎にまとめる。

$\pi_{fake}$  が 10% となるときの  $K_{eff}$  の結果について、ARICH がずれた状態のアライメント前の  $MC_{notalign}$ 、アライメント後の  $MC_{align}$ 、ARICH をずらしていない通常の MC(default) についてまとめたものを図 6.9 と表 6.1 に示す。同様に、 $K_{fake}$  が 10% となるときの  $\pi_{eff}$  の結果について図 6.10 と表 6.2 に示す。

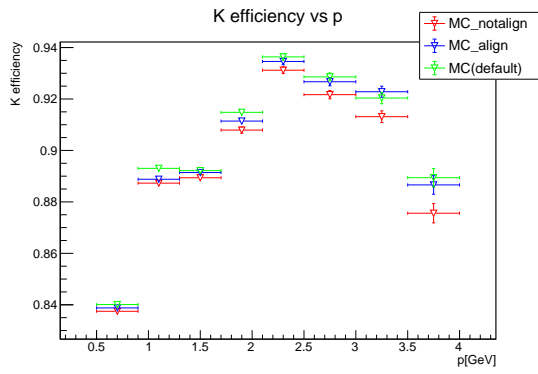


図 6.9: 通常の MC とアライメント前後の MC の  $K_{eff}$  vs p ( $\pi_{fake} \simeq 0.1$ )

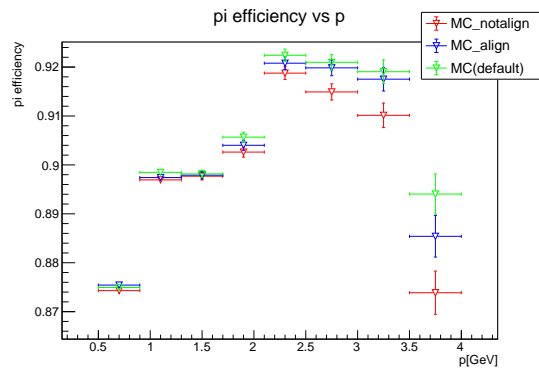


図 6.10: 通常の MC とアライメント前後の MC の  $\pi_{eff}$  vs p ( $K_{fake} \simeq 0.1$ )



運動量 p の範囲	0.5 ~ 0.9GeV	0.9 ~ 1.3GeV	1.3 ~ 1.7GeV	1.7 ~ 2.1GeV	2.1 ~ 2.5GeV	2.5 ~ 3.0GeV	3.0 ~ 3.5GeV	3.5 ~ 4.0GeV
$\pi_{eff}$ (MC_notalign)	0.8743±0.0005	0.8969±0.0006	0.8977±0.0008	0.9026±0.0010	0.9188±0.0013	0.9149±0.0016	0.9101±0.0025	0.8739±0.0044
$\pi_{eff}$ (MC_align)	0.8754±0.0005	0.8974±0.0006	0.8979±0.0008	0.9040±0.0010	0.9208±0.0013	0.9198±0.0016	0.9175±0.0024	0.8854±0.0042
$\pi_{eff}$ (MC(default))	0.8749±0.0005	0.8985±0.0006	0.8982±0.0008	0.9057±0.0010	0.9224±0.0013	0.9210±0.0016	0.9191±0.0024	0.8940±0.0041

表 6.1: 運動量別の  $\pi_{eff}$  の値 ( $K_{fake} \simeq 0.1$ )

運動量 p の範囲	0.5 ~ 0.9GeV	0.9 ~ 1.3GeV	1.3 ~ 1.7GeV	1.7 ~ 2.1GeV	2.1 ~ 2.5GeV	2.5 ~ 3.0GeV	3.0 ~ 3.5GeV	3.5 ~ 4.0GeV
$\pi_{eff}$ (MC_notalign)	0.8375±0.0012	0.8873±0.0009	0.8894±0.0011	0.9079±0.0012	0.9312±0.0013	0.9217±0.0016	0.9131±0.0023	0.8756±0.0038
$\pi_{eff}$ (MC_align)	0.8388±0.0012	0.8888±0.0009	0.8914±0.0011	0.9114±0.0012	0.9346±0.0013	0.9267±0.0016	0.9228±0.0022	0.8866±0.0036
$\pi_{eff}$ (MC(default))	0.8401±0.0012	0.8930±0.0009	0.8922±0.0011	0.9148±0.0012	0.9364±0.0013	0.9286±0.0016	0.9204±0.0022	0.8894±0.0036

表 6.2: 運動量別の  $K_{eff}$  の値 ( $\pi_{fake} \simeq 0.1$ )

誤識別率を 10% に固定した場合でも、全ての運動量要域において、アライメント前 ( $MC_{notalign}$ ) よりもアライメント後 ( $MC_{align}$ ) の検出効率が上がっていることが確認できる。特に高運動量帯の 3.5 GeV ~ 4.0 GeV において、アライメント前後で  $K_{eff}$  が 0.876 から 0.887 と 1.3% 向上し、 $\pi_{eff}$  も 0.874 から 0.885 と約 1.3% 向上した。

また、MC(default) とアライメント後 ( $MC_{align}$ ) を比較すると、 $MC_{align}$  の検出効率の方が低い結果となったが、ほぼ全ての運動量要域においてアライメント後 ( $MC_{align}$ ) の検出効率が MC(default) の検出効率の誤差の範囲内に収まっていることから、正しくアライメントフィットができていることがわかる。

## 第7章

### 結論

ARICH 検出器の構成要素である光検出器やエアロゲルの位置のずれは、ARICH 検出器の粒子識別性能に影響を及ぼすと考えられる。本研究では、ARICH 検出器内のエアロゲルと光検出器間での相対的な位置のずれの概算と、ARICH 検出器全体と Belle II 測定器の飛跡検出器の間での相対的な位置のずれの概算をそれぞれ行い、それらのずれが粒子識別性能に及ぼす影響の見積りを行った。

前者では、光検出器に対するエアロゲルの位置が、平面方向で最大 1.9mm、z 方向で最大 5.3mm ずれている可能性がわかった。また、各方向のエアロゲルのずれに関してチェレンコフ角度分解能  $\sigma_{\theta_c}$  から粒子識別性能  $S$  への影響を確認した結果、運動量  $4\text{GeV}/c$  のとき、エアロゲルを設置した平面方向の 1mm のずれでは粒子識別性能が約  $0.013\sigma$  低下、エアロゲルの外側の端の z 方向への 10mm のずれでは粒子識別性能が約  $0.562\sigma$  低下の結果となった。平面方向のエアロゲルの位置のずれについては、ずれと粒子識別性能の低下は比例せずに一定値に近づくと考えられるが、仮にずれの大きさと粒子識別性能  $S$  が比例関係にあるとしても、平面方向の 1.9mm は  $S$  が約  $0.025\sigma$  低下と影響が少ない。一方、z 方向のエアロゲルの位置のずれは粒子識別性能の低下と近似的に比例関係にあるため、5.3mm のずれは  $S$  が約  $0.298\sigma$  低下と影響を及ぼすと考えられる。

今後の課題としては、エアロゲルを一枚ずつずらし、実際にインストールされているエアロゲルのずれの詳細な様子や原因を探ること、ずれを補正するプログラムを Belle II ソフトウェア上に組み込みアライメントを行うこと、5章で述べる ARICH 検出器全体のずれとエアロゲルのずれの相関を見ることなどが挙げられる。また、各エアロゲルの中心部と枠付近でチェレンコフ角に偏りが見られるが、原因不明であるため今後の課題として更に調べる必要がある。

後者の ARICH 検出器全体の位置のずれに関しては、最新の実験データを用いて、xyz 並進・回転方向の 6 パラメータのずれの概算と補正（アライメント）を行い、アライメント前後の粒子識別性能の評価を行った。結果、実験データにおいて、6 パラメータのうち最大で x 並進方向約 1.41mm 程度のずれが予想される結果となったが、ずれの補正を行うことで約 0.03mm 程度まで抑えることが可能になった。エアロゲルのずれの算出の際と同様、チェレンコフ角度分解能から粒子識別性能  $S$  への影響を確認した結果、運動量  $4\text{GeV}/c$  のとき、アライメント後で約  $0.34\sigma$  粒子識別性能の向上が確認できた。

また、アライメント前後の  $K/\pi$  識別性能を実際にシミュレーションデータを用いて評価したところ、アライメント後の方が有意に粒子識別性能が上がっていることが確認できた。

特に、アライメント前後で、 $\pi(K)$  誤識別率を 10% に固定した場合における  $K(\pi)$  検出効率は、3.5 ~ 4.0GeV において 1.3% の向上が確認できた。

先行研究で挙げられていた課題はほぼすべて解決したが、MC のオフセットを除いた補正しきれていないずれ（特に ARICH 検出器の内側の領域）を補正するためには、6 パラメータ以外の新たなパラメータの導入等

を検討し、フィッティングの精度を上げる必要がある。

また、両者の位置のずれの相関関係についてみることも今後の課題としてあげられる。

# 謝辞

本論文の作成にあたり、多くの方々にご指導ご鞭撻を賜りました。

まず、角野秀一教授、汲田哲郎助教授、住吉孝行先生に感謝を申し上げます。特に角野秀一教授には終始面倒を見ていただき、親切丁寧に指導していただきました。本研究をここまで進めることができたのも全て角野秀一教授のお陰です。ありがとうございました。また、汲田哲郎助教授や住吉孝行先生にも発表スライドの添削やゼミでのご指導など、大変お世話になりました。研究室で学んだことを今後も役立てていきたいと思っています。親身にご指導いただき心より感謝申し上げます。

また、KEK の西田昌平先生ならびに ARICH グループの皆様にも厚く感謝を申し上げます。スライドの添削や研究のアドバイス、ソフトウェアに関する知識など、沢山のご指導をいただきました。ありがとうございました。

そして、本研究を進める上で一緒に頑張ってきた研究室の皆さんにも大変お世話になりました。先輩の在原拓司さんには、異なる研究グループでありながら本研究の細部までご相談に乗っていただき、沢山助けていただきました。在原さんの幅広い知識と親身にアドバイスして下さる人間性には尊敬しかありません。ありがとうございました。また、同じ Belle II に所属しており、ポストドクターであるトーマスさん、昨年卒業された朴兌秀さん、一昨年前に卒業された鶴藤昌人さんにも、研究を進めていく上での基礎知識をご教授いただきました。感謝申し上げます。同期である本橋完太君、古藤達郎君とは、お互いにアドバイスをしあい、ときには励ましあいながら、研究をしてきました。春の学校の際に、一緒に早朝の京都を観光したのは良い思い出です。お陰で本当に楽しい研究生生活を送ることができました。また、同じ研究室の北村君、鮫島君、古井君、岩野君、加藤君、黒川君、望月君にもお世話になりました。みんな個性がある人たちばかりの研究室で、楽しく居心地良く過ごすことができました。

そのほかにも、多くの方のご協力のもと本論文を完成させることができました。本研究に関わってくださったすべての方に感謝申し上げます。

最後に、経済面、生活面、その他全てにおいて支えてくださった家族にこの場を借りて感謝申し上げます。今までずっと、私のやりたいことや興味のあることを全て肯定してくれて、何ひとつ不自由ないように支えてくださったことは感謝しきれないです。お陰で後悔や諦めることなく好きなことに時間を費やすことができました。ありがとうございました。

## 参考文献

- [1] KEK 公式 web ページ ニュースルーム 標準理論を超えるためには, ”標準理論に現れる素粒子の表”, URL: [https://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Highlights/2012/08/31/image\\_01.jpg](https://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Highlights/2012/08/31/image_01.jpg)
- [2] T. Abe, et al. (Belle II Collaboration) ”Belle II technical design report”, arXiv preprint, arXiv:1011.0352, 2010
- [3] KEK 公式 web ページ, ”SuperKEKB 加速器全体の模式図”, URL: [https://www.kek.jp/wp-content/uploads/2021/10/20180320\\_superkekb\\_001.png](https://www.kek.jp/wp-content/uploads/2021/10/20180320_superkekb_001.png)
- [4] CKMfitter Group (J. Charles et al.), Eur. Phys. J. C41, 1-131 (2005) [hep-ph/0406184], updated results and plots available at: <http://ckmfitter.in2p3.fr>, URL: [http://ckmfitter.in2p3.fr/www/results/plots\\_spring21/ckm\\_res\\_spring21.html](http://ckmfitter.in2p3.fr/www/results/plots_spring21/ckm_res_spring21.html)
- [5] Charles J, Höcker A, Lacker H, et al. ”CP violation and the CKM matrix: assessing the impact of the asymmetric B factories.”, European Physical Journal C – Particles & Fields, 2005;41(1):1-131. DOI: 10.1140/epjc/s2005-02169-1
- [6] KEK 公式 web ページ, ”Belle II 測定器の全体図”, URL: [https://www.kek.jp/wp-content/uploads/2019/03/20180425\\_belle2\\_001.png](https://www.kek.jp/wp-content/uploads/2019/03/20180425_belle2_001.png)
- [7] Belle II 公式 web ページ, URL: [https://www.belle2.org/project/super\\_kekb\\_and\\_belle\\_ii/](https://www.belle2.org/project/super_kekb_and_belle_ii/)
- [8] E. Kou, et al. (Belle II Collaboration) ”The Belle II Physics Book”, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2019.12, ISSN 2050-3911, DOI 10.1093/ptep/ptz106.
- [9] I. Adachi, et al. (Belle II Collaboration) ”Detectors for extreme luminosity: Belle II”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Vol. 907, 2018, Pages 46 – 59, ISSN 0168-9002
- [10] K. Akai, K. Furukawa, H. Koiso. ”SuperKEKB collider”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Vol. 907, 2018, Pages 188 – 199, ISSN 0168-9002
- [11] S. Iwata. ”Development of the Aerogel RICH counter for a super B-factory experiment”. PhD thesis. Tokyo Metropolitan University, 2016, URL: <https://www-hep.phys.se.tmu.ac.jp/thesis/doc/2015-Dthesis-iwata.pdf>
- [12] M. Yonenaga. ”Particle Identification using the Aerogel RICH Counter at the Belle II Experiment”. PhD thesis. Tokyo Metropolitan University, 2020, URL: <https://www-hep.phys.se.tmu.ac.jp/thesis/doc/2020-Dthesis-yonenaga.pdf>
- [13] 爲近彩智 (2019 年都立大修士論文). ”Belle II 実験 Phase II ランにおける ARICH 検出器のアライメントおよび  $B \rightarrow K^* \gamma$  崩壊の探索”

- [14] 朴兌秀 (2022 年都立大修士論文). "Belle II 実験における ARICH 検出器のアライメント"
- [15] SuperKEKB 公式 web ページ, URL: <https://www-superkekb.kek.jp/>
- [16] Belle II Public web homepage, URL: <https://confluence.desy.de/display/BI/Belle+II+Luminosity#BelleIILuminosity-TotalrecordedintegratedluminositybeforeLongShutdown1>