

学位論文

COMPASS における核子内グルーオン偏極度測定のための高い時間分解能を持つ高計数率型シンチレーティングファイバー・トラッカーの開発研究

名古屋大学大学院理学研究科
素粒子宇宙物理学専攻 PT 研究室

2002 年

堀川 壮介



概要

1988 年、ヨーロッパ原子核研究機構 (CERN) の EMC 実験により報告された結果は「クォークスピンは核子スピンは殆ど寄与していない」ことを示し、核子スピンに対するそれまでの認識を一変させた。これに続く多くの精力的な研究の結果、クォークスピンの寄与は 20% から 40% と明らかに小さいことがわかってきている。では失われた核子スピンの残りは何が担っているのか？この説明として、核子中に存在するグルーオンのスピンの大きな寄与が示唆されている。核子スピンに対するグルーオンスピンの寄与を明らかにすることは現在世界的に求められている核子スピン構造研究の最重要課題である。

CERN の COMPASS 実験では、偏極ミュオンと偏極核子の深非弾性散乱の測定においてグルーオンが直接関与する過程のうち特に明解なプローブとして期待されるオープンチャーム生成を捕らえ、グルーオンスピンの寄与を示す核子内グルーオン偏極度の直接測定を行う。この極めて稀少な過程に基づいて物理的に意味のある高精度の測定を行うためには高いルミノシティが不可欠であり、COMPASS では 2×10^8 muons/spill の大強度偏極ミュオンビームを使用する。オープンチャームの大部分を占める quasi-real photon イベントにおいて最前方に散乱されるミュオンを補足するために、その測定系には (1) 最大で 100 MHz の入射粒子に対応できる高計数率耐性、(2) トリガー事象に関与した入射、散乱ミュオンの飛跡を特定するための 400 ps(rms) 以下の時間分解能、(3) 200 μ m 以下の位置分解能、を同時に満たす飛跡測定器を使用してビームの通過領域をカバーすることが不可欠である。これまでに、このような性能を満たす検出器は実用化されていない。

この性能を実現するため、位置感应型光電子増倍管を用いた高い時間分解能を持つ高計数率型シンチレーティングファイバー (SciFi) トラッカーを開発した。試作機による開発研究で最終的に直径 0.5 mm の SciFi の 7 層構造を採用し、この仕様で 97% 以上の検出効率、125 μ m(rms) の位置分解能とともに同種の検出器としては最高の 300 ps(rms) の時間分解能を得た。この試作機に 1.4×10^8 muons/spill の大強度ビームを直接入射してテストを行い、チャンネルあたりの計数率が最大で 4 MHz の苛酷な条件でも安定に所期の性能が得られることを確認した。この条件で 370 ps(rms) の時間分解能を得る等、これまでにない高い時間分解能を持つ高位置分解能、高計数率型の飛跡測定器を実現した。

この成果を受けて計 4 台の COMPASS 実験用 SciFi トラッカーの実機を建設し、2001 年、2002 年の COMPASS のグルーオン偏極度測定実験において全 1,152 チャンネルを所期の性能で安定に使用した。これにより 2002 年のデータ収集でグルーオン偏極度のプレリミナリーな値を導出するのに必要な統計を得るとともに、2003 年、2004 年と続く測定の成功に確信を与えた。2004 年までの測定結果を合わせた解析でグルーオン偏極度測定の第一次的な結果を与え、核子スピン構造の解明に大きく貢献することが期待できる。

目次

第1章	はじめに	9
第2章	COMPASS 実験における核子内グルーオン偏極度測定の原理と測定方法	14
2.1	グルーオン偏極度 $\Delta G/G$ 測定	15
2.1.1	オープンチャーム生成	16
2.1.2	オープンチャームの同定	19
2.1.3	期待される結果	20
第3章	COMPASS の実験装置	22
3.1	大強度偏極ミュオンビームと偏極核子標的	23
3.1.1	偏極ミュオンビーム	23
3.1.2	偏極核子標的	26
3.2	スペクトロメーター	29
3.2.1	スペクトロメーターの基本構成	29
3.2.2	ビーム運動量分析系 (BMS)	31
3.2.3	飛跡位置測定器群	32
3.2.4	RICH	37
3.2.5	カロリメーター	38
3.2.6	ミュオン検出系	39
3.3	ミュオン・トリガー	39
3.3.1	Quasi-real photon トリガー	40
3.3.2	包括的深非弾性散乱トリガー	41
3.4	データ収集システム	43
3.4.1	データ収集システムの構成	43
3.4.2	F1-TDC	45
3.4.3	CATCH	49

第 4 章	COMPASS 実験用シンチレーティングファイバー (SciFi) トラッカー	50
4.1	シンチレーティングファイバー・トラッカー概論	51
4.2	COMPASS 実験における SciFi トラッカー系の概要	52
4.2.1	核子内グルーオン偏極度測定における SciFi トラッカーの役割	53
4.2.2	COMPASS-SciFi トラッカー系	54
4.3	検出器の構造 ~ ファイバー・バンドル ~	60
4.3.1	ファイバー・バンドルの構造	61
4.3.2	シンチレーティングファイバーとクリアファイバー	64
4.3.3	ファイバー・バンドルの製作工程	67
4.4	位置感応型光電子増倍管 (PSPM)	72
4.5	ピークセンシング・ディスクリミネーター	74
第 5 章	高時間分解能、高計数率型 SciFi トラッカーの研究開発	78
5.1	2m ライトガイドを持つ試作機の時間分解能の測定	79
5.1.1	検出器の概要	79
5.1.2	実験条件	81
5.1.3	時間分解能	82
5.1.4	信号波高分布	83
5.2	マルチクラッド型ファイバーとシングルクラッド型ファイバーによる試作機の性能比較	85
5.2.1	検出器およびテスト実験の概要	85
5.2.2	生成光電子数の測定	86
5.2.3	時間分解能	86
5.3	構造の異なるファイバー・バンドルを持つ SciFi 検出器の基本性能テスト	87
5.3.1	検出器の概要	88
5.3.2	実験条件	90
5.3.3	信号波高分布	92
5.3.4	検出効率とマルチプリシティ	94
5.3.5	時間分解能	97
5.3.6	位置分解能	97
5.3.7	各パラメータの印加電圧依存性	99
5.3.8	まとめと考察	101
5.4	高計数率環境での性能評価	102
5.4.1	実験条件	102
5.4.2	信号波高分布	104

5.4.3	検出効率とマルチプリシティ	105
5.4.4	時間分解能	107
5.4.5	位置分解能	108
5.4.6	まとめ	110
5.5	H6568 の出力の磁場依存性と磁気シールドのテスト	111
第 6 章	COMPASS 実験用 SciFi トラッカーの建設と性能評価	115
6.1	COMPASS 実験用 SciFi トラッカーの建設	115
6.1.1	ファイバー・コラム間ピッチの決定	116
6.1.2	高圧電源とブースター回路	119
6.1.3	ユーロクレート・システム	121
6.1.4	PSC-PSPM モジュールのプレチューニング	123
6.1.5	架台と検出器ハウジングの製作	128
6.1.6	実機の建設と実験エリアへの設置	129
6.2	COMPASS 実験での運転と性能評価	133
6.2.1	オンラインモニタリング	133
6.2.2	ビームプロファイル	135
6.2.3	SciFi トラッカーによる飛跡の再構成	138
6.2.4	検出効率とマルチプリシティ	143
6.2.5	時間分解能	147
6.2.6	まとめ ~ 物理データ解析での使用 ~	148
第 7 章	結論と今後の展望	149

目 次

1.1	光電子増倍管中の電子軌道のスケーリングの概念図	11
2.1	グルーオンヘリシティ分布関数 $\eta\Delta G(\eta)$ の計算値	16
2.2	光子-グルーオン融合 (PGF) 過程のダイアグラム	17
2.3	D^0 生成の再構成のための運動学的カット	19
2.4	K 、 π の実験室系での放出角度と運動量の分布	20
2.5	非対称度の理論的予測と期待される測定精度	21
3.1	M2 ビームラインの模式図	24
3.2	π 、 K のミュオンへの崩壊	25
3.3	ミュオンビームの運動量に対する偏極度	26
3.4	COMPASS 用電磁石による偏極核子標的システム	27
3.5	2001 年の COMPASS スペクトロメータのセットアップ	30
3.6	BMS のセットアップ図	32
3.7	Micromegas 検出器の構造図と写真	34
3.8	GEM 検出器の構造図と動作原理	35
3.9	MWPC による飛跡位置測定結果の例	36
3.10	RICH 検出器	37
3.11	各トリガークラスによりカバーされる運動学的領域	40
3.12	COMPASS ミュオントリガーのセットアップ図	41
3.13	トリガー・マトリクスコンセプト	42
3.14	DAQ システムのダイアグラム	44
3.15	F1-TDC のダイアグラム	46
3.16	トリガーマッチングの概念図	48
4.1	COMPASS スペクトロメータの 2001 年のセットアップ図	55
4.2	COMPASS 偏極標的用ソレノイド電磁石の漏れ磁場	57
4.3	SciFi トラッカー・プレーンの基本構成	61
4.4	粒子検出部 SciFi アレイの構造	62

4.5	シングルクラッド型とマルチクラッド型ファイバーのクラッド構造	65
4.6	シングルクラッド型とマルチクラッド型ファイバーの光伝達の模式図	66
4.7	ファイバー接着用治具	68
4.8	治具表面の三角溝の概念図	69
4.9	シンチレーティングファイバーとクリアファイバーの接続	70
4.10	レイヤー・ペインティング用治具	71
4.11	レイヤー積み上げ用治具	72
4.12	H6568 で得られた単一光電子ピーク	73
4.13	ピークセンシング回路 (PSC) の原理	75
4.14	第 9 コラムを粒子が通過したイベントに対する飛跡分布	76
5.1	10 および 6 レイヤー構造の SciFi アレイの断面図	80
5.2	SciFi アレイとライトガイドの接続の概念図	80
5.3	ライトガイドと PSPM の接続用アタッチメント (ディスクット)	81
5.4	$\gamma 3$ ビームライン上の実験装置のセットアップ	82
5.5	10 レイヤーの試作機 SF1 の時間分解能測定の結果	83
5.6	6 レイヤーの試作機 SF2 の時間分解能測定の結果	83
5.7	各プレーンのあるチャンネルから得られた信号波高分布	84
5.8	単一ヒットイベントでカットをかけた信号波高分布	84
5.9	各プレーンの各チャンネルで得られた生成光電子数の比較	86
5.10	2 種類のファイバー・バンドル H7 と H13 の SciFi アレイの構造	88
5.11	H7 試作機の単一プレーンの基本構成	89
5.12	延長ライトガイド・バンドルの概念図	90
5.13	T11 ビームラインでのテスト実験のセットアップ	91
5.14	3 種類の試作機 (a)H7、(b)H7L、(c)H13 で得られた信号波高分布スペクトル	93
5.15	カットをかけて得られた (a)H7、(b)H7L、(c)H13 の信号波高分布スペクトル	93
5.16	H7A、B プレーンの各入射チャンネルに対する検出効率	95
5.17	(a)H7、(b)H7L、(c)H13 の各プレーン A のヒットマルチプリシティ分布	96
5.18	各試作機のプレーン A、B の第 8 チャンネルから得られた信号の時間差分布	97
5.19	3 種類の試作機の各チャンネルで得られた時間分解能の測定結果	98
5.20	H7A、B プレーン上の飛跡検出位置の相関図	98
5.21	第 8 チャンネルに粒子が入射したイベントのプレーン内の飛跡分布図	99
5.22	検出器の基本性能を示す各パラメータの印加電圧依存性	100
5.23	M2 ビームラインでのテスト実験のセットアップ	102
5.24	高強度ミュオンビームのビームプロファイル	103

5.25	信号波高分布スペクトル	104
5.26	検出効率	105
5.27	マルチプリシティ分布	106
5.28	時間分解能の測定結果	107
5.29	F1-TDC による高計数率での時間分解能の測定結果	109
5.30	F1-TDC による高計数率での各チャンネルの時間分解能	109
5.31	位置分解能測定結果	110
5.32	H6568 のメタルチャンネル・ダイノードの構造及び座標系	111
5.33	(a)Z、(b)X、(c)Y 方向の外部磁場に対する出力信号波高の変化	112
5.34	角柱型鉄製磁気シールドのテスト結果	113
6.1	0.433 mm ピッチの場合の計算結果	117
6.2	0.41 mm ピッチの場合の計算結果	118
6.3	粒子の入射角度に対する計算結果	118
6.4	アクティブ・ブースター回路の簡略化した回路図	120
6.5	SF2 ステーション Y プレーンのユーロクレート	122
6.6	リモートコントロールの構成	123
6.7	PSC-PSPM モジュールのプレチューニングの結果	125
6.8	ブランチ 0 の PSC-PSPM 各モジュールのプレチューニングの結果	127
6.9	ブランチ 1 の PSC-PSPM 各モジュールのプレチューニングの結果	127
6.10	ブランチ 2 の PSC-PSPM 各モジュールのプレチューニングの結果	128
6.11	ビームホドスコープ・ステーション (SF1、SF2) 用検出器ハウジング	130
6.12	ターゲット・ステーション (SF3、SF4) 用検出器ハウジング	131
6.13	SF1 と SF2 ステーション	132
6.14	SF3 ステーション	132
6.15	SF4 ステーション	133
6.16	COOOL のオンラインモニターウィンドウ	134
6.17	SciFi トラッカーのオンラインモニタリングの例	134
6.18	全 10 ステーションから得られた高強度ミューオンビームのプロファイル	136
6.19	SF1XY プレーンを用いて得られた 2 次元ビームプロファイル	136
6.20	SF1XY プレーン各チャンネルの計数率	137
6.21	SF1 と SF2 のテレスコープで測定したビームトラックの傾きの分布	138
6.22	SF2X プレーンの第 48 チャンネルとトリガー信号との時間差スペクトル	139
6.23	SF2X プレーンとトリガー信号との時間差スペクトル	139
6.24	T_0 較正後の SF2X プレーンとトリガー信号との時間差スペクトル	141

6.25	低強度ビームで較正した T_0 を用いた高強度での測定	142
6.26	再構成された飛跡位置と実際の検出チャンネルの相関図	142
6.27	再構成された飛跡位置と実際の検出位置の距離分布	143
6.28	SF2X、Y プレーンの検出効率とヒットマルチプリシティ分布	144
6.29	SF4 の検出効率とヒットマルチプリシティ分布	145
6.30	全 10 プレーンの検出効率	146
6.31	SF1 と SF2 の間の飛跡の時間差分布	147
6.32	SF2 と SF4 の時間分解能の測定結果	148

表 目 次

2.1	ミューオンビームの運動量 100 GeV/c における、光子エネルギーに対する チャーム生成断面積	17
3.1	COMPASS 飛跡測定系を構成する各グループ	30
4.1	COMPASS ミューオンプログラムにおける各 SciFi ステーションの仕様 . .	54
4.2	COMPASS-SciFi トラッカーに要求される性能	59
4.3	クラレ社プラスチック光学ファイバーの材質	65
4.4	クラレ SCSF-38(M)、SCSF-78(M, MJ) の特性	66
4.5	COMPASS 用 PSC モジュールの基本仕様	77
5.1	3 種類のディスクリミネーターを使用した時間分解能の測定結果	87
5.2	3 種類の試作機 H7、H7L、H13 の基本仕様	90
5.3	3 種類の試作機で得られた時間分解能と生成光電子数の測定結果	101
6.1	ユーロクレート・システムの例	121
6.2	各ステーションの標的中心からの距離とビームサイズ	137

第1章

はじめに

"核子のスピンは何が担っているのか?" この極めて素朴な疑問に答えることは、QCDを基礎にしたハドロン物理学の重要な課題である。

核子のスピン構造を記述するスピン依存構造関数は、Yale-SLAC 共同実験グループによる E80 実験 [1] で初めて実験的に測定され、続いて 1978 年に E130 共同実験 [2] において測定されている。その後、1980 年代の前半までは、核子スピンは核子を構成する 3 つのクォークのスピンの合成で記述される、と単純に考えられていた。

1988 年、CERN の EMC (Europe Muon Collaboration) グループによって報告された偏極深非弾性散乱実験の結果 [3, 4] は、当時の認識からすれば驚くべきものであった。すなわち、「クォークスピンは核子スピンにほとんど寄与していない」というのである。この結果はさらに、ストレンジクォークが陽子スピンに対して逆向きに偏極しており、単純なクォークモデルで記述される Ellis-Jaffe 和則 [5] が破れていることを示唆した。後に「スピנקライシス」と呼ばれるこの EMC 実験の結果が報告されて以来、これを説明するべく世界中で多くの理論的、実験的な努力が払われてきた。

CERN において EMC の後を受けた SMC (Spin Muon Collaboration) 実験 [6, 7, 8, 9, 10] は、スペクトロメーター、偏極標的およびビームポラリメーターのアップグレードにより到達可能な運動学的限界を広げ、構造関数の統計的、系統的な測定精度を向上させた。また、SMC での陽子と重陽子の構造関数の測定によって、世界で初めて実験的に中性子のスピン依存構造関数の決定が行われた。これにより Bjorken 和則 [11, 12] の検証が行われ、実験結果とよい一致を見せたことで、構造関数の QCD での取扱いが適切であることが示された。

理論の面からも、QCD の枠組みの中でスピン依存構造関数を理解するための研究が精力的に行われた。スピんに依存する QCD の発展方程式が強い結合定数 α_s の NLO (Next-to-Leading Order) まで計算されたことで、構造関数の NLO-QCD 解析が可能になった。実験データが得られていない Bjorken- x の小さい領域での構造関数の振る舞いが第 1 モーメントの決定に特に大きな影響を与えることから、これについての徹底的な研究が行われた。

実験的には、CERN 以外でも SLAC の E142、E143、E154、E155 の一連の実験 [13, 14,

15, 16, 17, 18, 19, 20] や、DESY の HERMES 実験 [21] 等、多くの偏極深非弾性散乱実験が実験データを提供してきた。これらの実験は互いに相補的な運動学的領域をカバーしており、幅広い領域にわたって構造関数の測定データが提供された。これらの実験の中で、SMC 実験は x については最小、 Q^2 については最大の領域をカバーし、最大の不定性を与える $x \rightarrow 0$ への外挿の精度に大きく貢献した。

これらの研究の結果、クォークスピンについては多くの情報が得られており、クォークの偏極分布関数 $\Delta\Sigma(x)$ およびその積分値でクォークスピンの寄与を表す $\Delta\Sigma$ はかなりよい精度で決定されている。SMC グループの行った NLO までの QCD フィットの結果 [22] では、代表的な構造関数の取り扱い方 (スキーム) である $\overline{\text{MS}}$ スキーム [23]、AB スキーム [24] を用いて、 $Q^2 = 1 \text{ GeV}^2$ においてそれぞれ $\Delta\Sigma_{\overline{\text{MS}}} = 0.19 \pm 0.05(\text{stat}) \pm 0.04(\text{syst})$ 、 $\Delta\Sigma_{AB} = 0.38 \pm 0.03(\text{stat}) \pm 0.03(\text{syst})$ が得られている。このように、スキームの選び方、また Q^2 にもよるが、クォークスピンの寄与は大体 20% から 40% の程度であることがわかってきた。これは、クォークスピンの寄与はゼロではないが、ナイーブなクォーク・パートンモデル (QPM) から期待される値に比べ、やはり明らかに小さいことを意味している。

クォークスピンの寄与が小さいならば、失われた残りの核子スピンは一体何が担っているのだろうか。この候補として考えられるのは、核子中に存在するグルーオンのスピンや、クォーク、グルーオンの軌道角運動量である。

グルーオンスピンの寄与は、これまでの包括的偏極深非弾性散乱実験で得られたスピン依存構造関数 $g_1(x, Q^2)$ に対し、QCD の発展方程式 (DGLAP equation [25, 26, 27]) を用いてフィットを行うことで、ある程度推定できる。しかしながら、現状ではこの方法で推定したグルーオンの偏極分布関数 $\Delta g(x)$ は大きなエラーを含んでしまう。上述した SMC グループによる NLO-QCD フィットの結果でも、 $\Delta g(x)$ の積分値 $\Delta G = \int_0^1 \Delta g(x) dx$ は、 $Q^2 = 1 \text{ GeV}^2$ 、AB スキームで

$$\Delta G = 0.99_{-0.31}^{+1.17}(\text{stat})_{-0.22}^{+0.42}(\text{sys})_{-0.45}^{+1.43}(\text{theory})$$

と、非常に大きなエラーを与えている。この結果はグルーオンのかなり大きな寄与を示唆してはいるが、断定的なことは言えない。これは、グルーオンの効果は NLO のみで現れるため深非弾性散乱では LO (Leading Order) の効果に隠れてしまうからである。グルーオンスピンの寄与を調べるためには、やはり LO でグルーオンが関与する過程を積極的に抽出し、直接的に測定する必要がある。グルーオンスピンの寄与を示す核子内グルーオン偏極度 $\Delta G/G$ の直接測定は、核子スピン構造研究における現在の最重要課題である。

CERN の COMPASS (COmmon Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy) 国際共同実験では、偏極ミュオンビームと偏極核子標的による深非弾性散乱で、グルーオンが関与する過程のみを積極的に抽出する "Semi-inclusive" 測定を行い、グルーオン偏

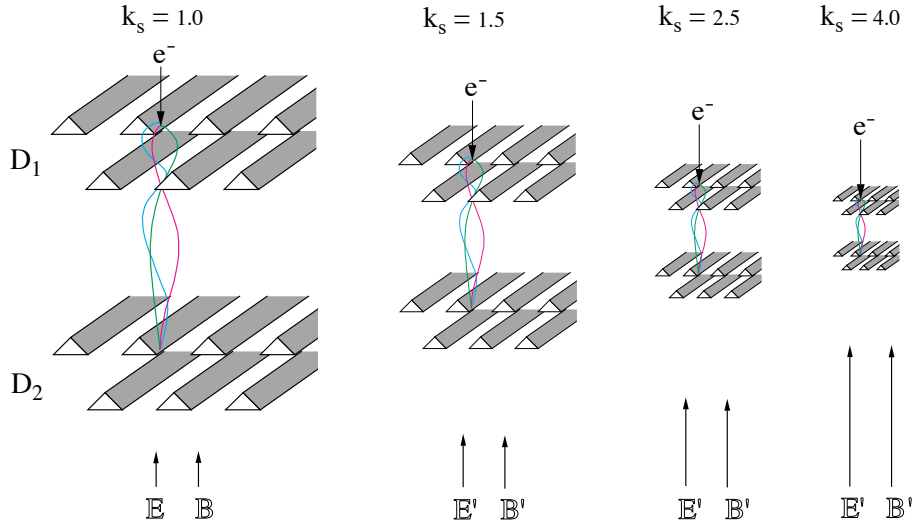


図 1.1: 光電子増倍管中の電子軌道のスケーリングの概念図 [30]。

極度 $\Delta G/G$ の直接測定を行う。COMPASS 以外にも各国の複数の研究機関でグルーオン偏極度測定実験計画が進行中であり、同様の"Semi-inclusive"偏極深非弾性散乱実験として DESY-HERMES が他に先駆けて第一次的な結果を報告している [28] が、現状ではグルーオン偏極について明確な結果が得られているとは言い難い。また、BNL の偏極陽子-陽子コライダー RHIC でも $\Delta G/G$ 測定実験が計画され、近い将来に測定が開始される。

本論文は、COMPASS において核子内グルーオン偏極度 $\Delta G/G$ の直接測定を行うことを目的とした、位置感応型光電子増倍管 (**Position-Sensitive Photomultiplier, PSPM**) を用いた高い時間分解能を持つ高計数率型シンチレーティングファイバー (**SciFi**) トラッカーの開発研究の成果を報告するものである。

1981 年、黒田らによって発表された位置感応型光電子増倍管 (PSPM) に関する論文 [29] で、世界で初めて電子軌道のスケーリング則が光電子増倍管の性能と関連して記述された。

よく知られているように、ローレンツ方程式は以下のような変数変換に対し不変である。

$$\mathbf{r}' = \mathbf{r}/k_s, \quad t' = t/k_s, \quad \mathbf{E}' = k_s \mathbf{E}, \quad \mathbf{B}' = k_s \mathbf{B}. \quad (1.1)$$

図 1.1 にこのスケーリング則の概念図を示す。ここに示したように、光電子増倍管のダイノードの構造を相似的に縮小していくと電子軌道も比例してスケールダウンする。電磁場は同じファクター k_s で増加する。磁場 $B = 0$ の場合、電場の条件は単純に同じダイノードポテンシャルを維持することで満たされる。

この性質は光電子増倍管の性能に以下のようなポジティブな効果をもたらす。

- (1) 空間分解能は $r' = r/k_s$ のように空間変数の減少により向上する。
- (2) 時間分解能も $t' = t/k_s$ のように時間変数の減少により向上する。
- (3) よく知られているように、電場の増加 $E' = k_s E$ は空間電荷による電子軌道への影響を減少させる。これに伴って増幅率のリニアリティが向上する。
- (4) 電子軌道を損なわない磁場の増加 $B' = k_s B$ は磁場に対する増幅率の安定性をもたらす。

このスケーリング則は、恐らく一世紀以上知られているローレンツ方程式の単純な性質である。しかしながら、上記論文の発表と同時期に始まった本格的な開発研究の結果として1990年代前半にPSPMの目覚ましい発展がもたらされ、実用化に至ったということは注目に値する。こうして近年になって大きく進歩を遂げたPSPMにより、高エネルギー、原子核物理学実験のみならず、医療用画像機等の幅広い分野で様々な応用が可能となった。

シンチレーティングファイバー (SciFi) トラッカーは、光ファイバー状のシンチレーターを用いた高位置分解能のホドスコープ検出器である。細いファイバーの使用により高い位置分解能が得られるだけでなく、空間を細かく分割し、個々のチャンネルの計数率を抑えることで、より高い入射粒子の計数率への対応が可能になる。

SciFi トラッカーにおいて、シンチレーション光の読み出しには様々な光検出デバイスが使用されているが、PSPM はそれらの中で最も高計数率に強く、高い時間分解能を持つことがその最大の特徴である。また、PSPM は取り扱いの簡単さ、信頼性の高さといった優れた性質を持つ。これらの特徴により、SciFi トラッカーの読み出しにPSPMを用いることでSciFiの持つ信号生成時間の速さ、放射線損傷に対する高い耐性等の優れた特徴を最も有効に生かすことができる。PSPMを用いたSciFi トラッカーはCERNのRD-17 (FAROS) コラボレーションを中心に1990年代前半から精力的に開発研究が行われ、SciFiとPSPMの組み合わせにより高い位置分解能と空間分解能を同時に持つ理想的な飛跡測定器を実現し得ることが示されてきた[31, 32, 33]。高位置精度、高計数率の検出器の開発は粒子物理学実験の技術開発の中でも最も精力的に研究が行われている分野であるが、SciFiは位置分解能では現在のところガスチェンバーや半導体検出器等に及ばないながら、高計数率耐性や時間分解能の点で、大きな優位性を示している。

飛跡測定器としてだけではなく、PSPMを用いたSciFi トラッカーはその高速応答性により、たとえばトリガーのより早い段階でのイベント選択においてSciFi トラッカーで測定された飛跡位置情報を利用する、いわゆる *topological trigger* デバイス[34]への応用等、様々な可能性を持っている。近年、PSPMの技術の目覚ましい進歩により比較的安価で小

型のマルチアノード型 PSPM が市場に登場し、大量のファイバーチャンネルをコンパクトな装置で読み出すことが可能になった。

本論文では、第 2 章でまず COMPASS 実験における核子内グルーオン偏極度測定の原理と測定方法を解説し、第 3 章でこの測定を実現するために本質的に重要である特徴的な実験装置について、個々のコンポーネントごとに概要を述べる。第 4 章で、この実験装置のうち私自身が開発研究を担当した COMPASS-SciFi トラッカー系について、実験から要求される性能、検出器の構造、製作工程等を詳細に解説する。第 5 章では、COMPASS-SciFi トラッカーに要求される高計数率と高い時間分解能の実現を中心的な目標として行った、PSPM を用いた SciFi トラッカー試作機の開発研究の成果を詳しく報告する。第 6 章で、2001 年までに私が担当して建設を行った COMPASS 実験用 SciFi トラッカーの実機の概要と、2002 年までの COMPASS のテスト実験とグルーオン偏極度測定の本実験で実際に使用し、測定したデータの解析により評価した実機の性能について述べる。最後に第 7 章で、結論と今後の展望を述べる。

第2章

COMPASS 実験における核子内グルーオン偏極度測定の原理と測定方法

核子スピンは次のように各構成粒子の寄与に分解して記述できる。

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2}\Delta\Sigma + \Delta G + L_q + L_g \quad (2.1)$$

ここで $\Delta\Sigma$ と ΔG はそれぞれクォークとグルーオンのスピンの寄与である。 L_q 、 L_g はクォークとグルーオンの軌道角運動量を表す。

CERN-SMC、SLAC、DESY-HERMES 等における一連の偏極深非弾性散乱実験の結果から、クォークスピンの寄与 $\Delta\Sigma$ が単純なクォークモデルの描像 ($\Delta\Sigma = 1$) とは異なり、20%から 40% (Q^2 、スキームの選び方に依存する) と明らかに小さいことがわかってきた。クォークスピンの寄与 $\Delta\Sigma$ は

$$\Delta\Sigma = \Delta u + \Delta\bar{d} + \Delta d + \Delta\bar{u} + \Delta s + \Delta\bar{s} \quad (2.2)$$

のように、核子中の各フレーバーのクォーク、反クォークのスピンの寄与の和で定義される。

クォークスピンの寄与がかなりよい精度で決定されているのに対し、グルーオンスピン、および軌道角運動量の寄与については未だよくわかっていない。グルーオンスピンの寄与は、偏極深非弾性散乱の実験で得られたスピン依存構造関数 $g_1(x, Q^2)$ に対し、その Q^2 依存性を記述する QCD の発展方程式 (DGLAP equation) を用いてフィットを行い、ある程度推定が可能である。しかし、SMC グループの行った NLO (Next-to-Leading Order) までの QCD フィット [22] ($Q^2 = 1 \text{ GeV}^2$ 、AB スキーム) によれば、クォークスピンの寄与 $\Delta\Sigma$ が

$$\Delta\Sigma = 0.38^{+0.03}_{-0.03}(\text{stat})^{+0.03}_{-0.02}(\text{sys})^{+0.03}_{-0.05}(\text{theory}) \quad (2.3)$$

とかなり精度よく決定しているのに対し、グルーオンスピンの寄与 ΔG は

$$\Delta G = 0.99^{+1.17}_{-0.31}(\text{stat})^{+0.42}_{-0.22}(\text{sys})^{+1.43}_{-0.45}(\text{theory}) \quad (2.4)$$

と、非常に大きなエラーを与えてしまう。グルーオン偏極を決定するためには、グルーオンを LO (Leading Order) で含む過程を積極的に抽出し、調べることが不可欠である。

1996 年に、SMC の共同研究者らを中心にして CERN のミュオンビームを用いてグルーオンスピンの寄与を調べる実験が提案された。これは当初、HMC (Hadron Muon Collaboration) 実験グループとして計画が進められた。一方、同時期に、ハドロンビームを用いてメソンスペクトロスコーピーやチャームバリオンを研究する実験が提案されていた。この二つの実験は、大型の RICH を含む二段のスペクトロメーターの使用という点で共通していたため、一つの共同研究グループとして装置を建設し、実験を行うように、との CERN の SPSLC のアドバイスを受け、二つのグループを融合して実験計画を作ることが合意された。

この計画は COMPASS (COMmon Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy) と名付けられ、1997 年 2 月に CERN において正式に採択された。すなわち、COMPASS では偏極ミュオンビームを用いて核子のスピン構造を研究する"ミュオンプログラム"とハドロンビームを用いてメソンスペクトロスコーピーやチャームバリオンを研究する"ハドロンプログラム"の二つの大きな実験が計画されており、2000 年にまずミュオンプログラムから開始された。

本章では、本研究の目的である COMPASS ミュオンプログラムにおけるグルーオン偏極度 $\Delta G/G$ の測定原理と測定方法、期待される結果について述べる。

2.1 グルーオン偏極度 $\Delta G/G$ 測定

Ellis-Jaffe 和則の破れは、核子内グルーオンのかなりの偏極を仮定することで説明することができる [35, 36, 37]。図 2.1 に、3 種類の異なるパラメータ設定に基づいて得られたグルーオンの偏極分布関数 $\Delta G(\eta)$ を示す [38]。 η はグルーオンの運ぶ運動量の割合である。最近の理論的な計算 [38, 39, 24, 40] は、共通してグルーオンの正の偏極を示唆している。 $\eta\Delta G(\eta)$ は無偏極グルーオン分布 $G(\eta)$ が顕著に下がりだす $\eta = 0.1$ 付近で最大値をとり、このとき $\Delta G/G \approx 0.5$ になっている。

COMPASS における核子内グルーオン偏極度 $\Delta G/G$ 測定は、光子-グルーオン融合過程 (Photon-Gluon Fusion; PGF) に起因する以下の 2 種類のイベントのスピンの非対称度測定に基づいている。

- (1) オープンチャーム生成: チャームクォークにより D^0 中間子が生成される過程を捕らえる。
- (2) High- p_T ハドロン対生成: 横方向に大きな運動量を持って放出される π 、 K 等の軽いハドロンの対を捕らえる。

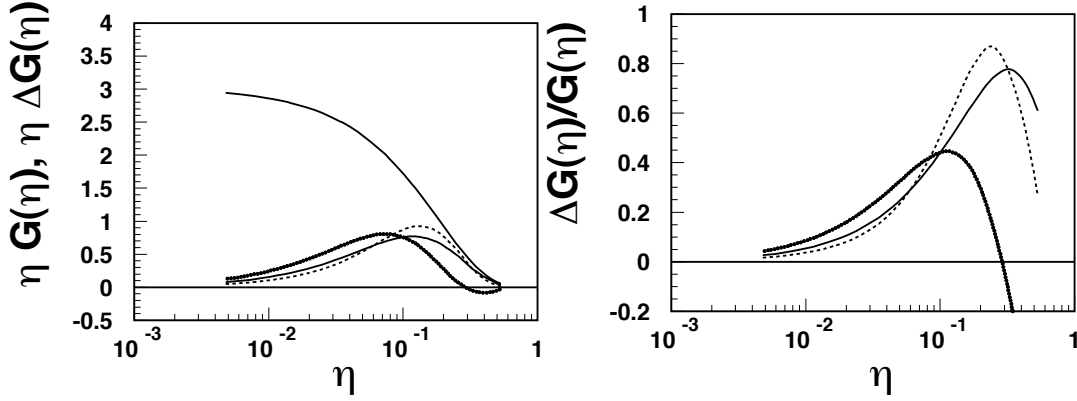


図 2.1: グルーオンヘリシティ分布関数 $\eta\Delta G(\eta)$ の計算値。グルーオンの担う核子の運動量に占める割合 η の関数としてプロットしたもの。異なるパラメータ設定: セット A(実線)、セット B(破線)、セット C(太実線) による [38]。左図の上の実線は $\eta G(\eta)$ を示す (Duke&Owens セット 1.1)。右図は同じパラメータ設定によるグルーオン偏極度 $\Delta G(\eta)/G(\eta)$ 。

オープンチャーム生成は LO (Leading Order) で PGF 過程のみが寄与するので、グルーオンの特に直接的なプローブになる。チャームクォークは核子中に殆ど存在しないので、核子中のクォークからの寄与は無視することができる。CERN の偏極ミュオンビームの使用は、このチャンネルでの測定に非常に有利である。

本節では、特にこのオープンチャーム生成に基づいた $\Delta G/G$ 測定の測定原理と、実験で期待される結果について述べる。

2.1.1 オープンチャーム生成

図 2.2 に、ミュオンと核子の深非弾性散乱による光子-グルーオン融合 (Photon-Gluon Fusion; PGF) 過程の最低次のファインマン・ダイアグラムを示す。このときのオープンチャームの断面積は以下で与えられる。

$$\frac{d^2\sigma^{\mu N \rightarrow c\bar{c}X}}{dQ^2 d\nu} = \Gamma(E; Q^2, \nu) \sigma^{\gamma^* N \rightarrow c\bar{c}X}(Q^2, \nu) \quad (2.5)$$

仮想光子のフラックス $\Gamma(E; Q^2, \nu)$ は

$$\Gamma(E; Q^2, \nu) = \frac{\alpha_e}{2\pi} \frac{2(1-y) + y^2 + Q^2/2E^2}{Q^2(Q^2 + \nu^2)^{1/2}} \quad (2.6)$$

で与えられる。 E と ν はそれぞれ入射ミュオンと光子のエネルギーであり、 y は光子に与えられるエネルギーの比で $y = \nu/E$ と表される。仮想光子によるチャーム生成の断面積

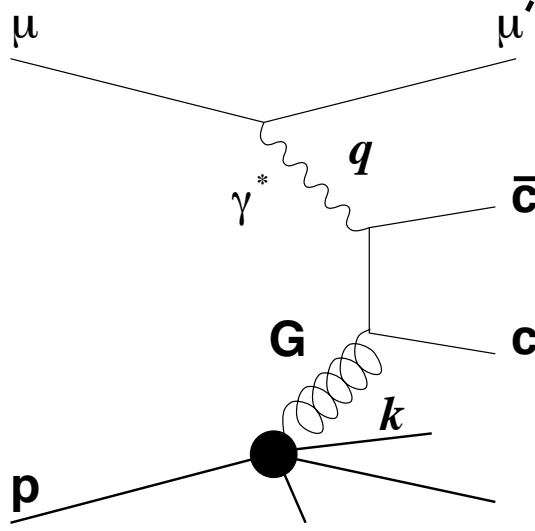


図 2.2: 光子-グルーオン融合 (PGF) 過程のダイアグラム。

$\sigma^{\gamma^* N \rightarrow c\bar{c}X}(Q^2, \nu)$ は、photoproduction の断面積 $\sigma^{\gamma N \rightarrow c\bar{c}X}(\nu)$ と以下のように関係している。

$$\sigma^{\gamma^* N \rightarrow c\bar{c}X}(Q^2, \nu) = \frac{\sigma^{\gamma N \rightarrow c\bar{c}X}(\nu)}{(1 + Q^2/M_0^2)^2} \quad (2.7)$$

質量パラメータ $M_0 = 3.9 \text{ GeV}$ は実験データへのフィットにより決定されている [41]。Photoproduction の断面積 $\sigma^{\gamma N \rightarrow c\bar{c}X}(\nu)$ はいくつかの実験で測定されている [42]。後の議論で使用した値は表 2.1 の第 2 列に $\sigma^{c\bar{c}}$ として与えてある。

COMPASS で実際に測定される物理量は、ミューオンによるオープンチャーム生成のスピン非対称度 A^{exp} である。これはミューオンと標的核子のスピンの向きが平行、反平行

表 2.1: ミューオンビームの運動量 $100 \text{ GeV}/c$ における、光子エネルギーに対するチャーム生成断面積。

ν GeV	$\sigma^{c\bar{c}}$ nb	Q_{min}^2 GeV ²	Q_{max}^2 GeV ²	$\Delta\nu \int_{Q_{min}^2}^{Q_{max}^2} \frac{d\sigma^{c\bar{c}}}{dQ^2 d\nu} dQ^2$ nb	D	$\int \sigma_\gamma$ μb	$R = \frac{\sigma^{c\bar{c}}}{\sigma_\gamma}$
35–45	186	0.0029	15.0	0.543	0.470	0.184	$2.95 \cdot 10^{-3}$
45–55	234	0.0055	12.5	0.456	0.600	0.117	$3.90 \cdot 10^{-3}$
55–65	276	0.0089	10.0	0.375	0.724	0.077	$4.87 \cdot 10^{-3}$
65–75	309	0.0180	7.5	0.298	0.835	0.052	$5.73 \cdot 10^{-3}$
75–85	341	0.0353	5.0	0.229	0.923	0.033	$6.94 \cdot 10^{-3}$
35–85				1.9	$\bar{D} = 0.66$	0.463	$\bar{R} = 4.1 \cdot 10^{-3}$

の場合のイベント数 $N_{c\bar{c}}$ によって以下のように与えられる。

$$A^{exp} = \frac{N_{c\bar{c}}^{\uparrow\downarrow} - N_{c\bar{c}}^{\uparrow\uparrow}}{N_{c\bar{c}}^{\uparrow\downarrow} + N_{c\bar{c}}^{\uparrow\uparrow}} = P_B \cdot P_T \cdot f \cdot A_{\mu N}^{c\bar{c}}(y) \quad (2.8)$$

ここで P_B と P_T はビームと標的の偏極度であり、 f は標的物質中の偏極可能な核子の割合 (Dilution Factor) である。

非対称度 $A_{\mu N}^{c\bar{c}}$ は仮想光子について記述される非対称度 $A_{\gamma N}^{c\bar{c}}$ と以下のように関係している。

$$A_{\mu N}^{c\bar{c}} = D \cdot A_{\gamma N}^{c\bar{c}} \quad (2.9)$$

ここでミュオンに対する仮想光子の減偏極因子 D (depolarization factor) は近似的に以下のように書ける。

$$D(y) \approx \frac{1 - (1 - y)^2}{1 + (1 - y)^2} \quad (2.10)$$

非対称度 $A_{\gamma N}^{c\bar{c}}$ はチャーム生成のヘリシティに依存する断面積 $\Delta\sigma^{\gamma N \rightarrow c\bar{c}X}$ とヘリシティについて平均した断面積 $\sigma^{\gamma N \rightarrow c\bar{c}X}$ の比で与えられる。これらは素過程の光子-グルーオン断面積

$$\Delta\sigma(\hat{s}) = \frac{4}{9} \frac{2\pi\alpha_e\alpha_s(\hat{s})}{\hat{s}} [3\beta - \ln \frac{1+\beta}{1-\beta}] \quad (2.11)$$

$$\sigma(\hat{s}) = \frac{4}{9} \frac{2\pi\alpha_e\alpha_s(\hat{s})}{\hat{s}} [-\beta(2 - \beta^2) + \frac{1}{2}(3 - \beta^4)\ln \frac{1+\beta}{1-\beta}] \quad (2.12)$$

とグルーオン分布 ΔG と G の convolution として、以下のように書ける。

$$A_{\gamma N}^{c\bar{c}}(E, y) = \frac{\Delta\sigma^{\gamma N \rightarrow c\bar{c}X}}{\sigma^{\gamma N \rightarrow c\bar{c}X}} = \frac{\int_{4m_c^2}^{2M_N Ey} d\hat{s} \Delta\sigma(\hat{s}) \Delta G(\eta, \hat{s})}{\int_{4m_c^2}^{2M_N Ey} d\hat{s} \sigma(\hat{s}) G(\eta, \hat{s})} \approx \langle A_{LL} \rangle \langle \frac{\Delta G}{G} \rangle \quad (2.13)$$

ここで $\beta = \sqrt{1 - 4m_c^2/\hat{s}}$ は c.m. 系でのチャームクォークの速度、 $\hat{s} = (q + k)^2$ は光子-グルーオン系の不変質量、 q と k はそれぞれ光子とグルーオンの 4 元運動量、 $\eta = \hat{s}/2M_N Ey$ はグルーオンの担っている核子の運動量の割合である。

Gluck[43]、Watson[44]、Vogelsang[45] で議論されているように、(2.13) 式のスピンに依存する断面積 $\Delta\sigma^{\gamma N \rightarrow c\bar{c}X}$ は、選択したモデルによるが、光子エネルギー 80 GeV 付近で最大となり、エネルギーが増加するにつれて減少する。一方でスピンについて平均した断面積 $\sigma^{\gamma N \rightarrow c\bar{c}X}$ は光子エネルギーの増加に伴って増加する。

Gluck[46] の議論により、この非対称度は Q^2 に依存しないと仮定する。PGF 断面積に対する寄与については非常に小さな Q^2 の領域が支配的である。

表 2.1 の第 5 列は ν を 10 GeV ごとに区切って、測定可能な Q^2 の全範囲にわたって積分したチャーム断面積 ((2.5) 式) を示す。積分の下限は散乱角度 $\theta = 0$ で与えられる $Q_{min}^2 =$

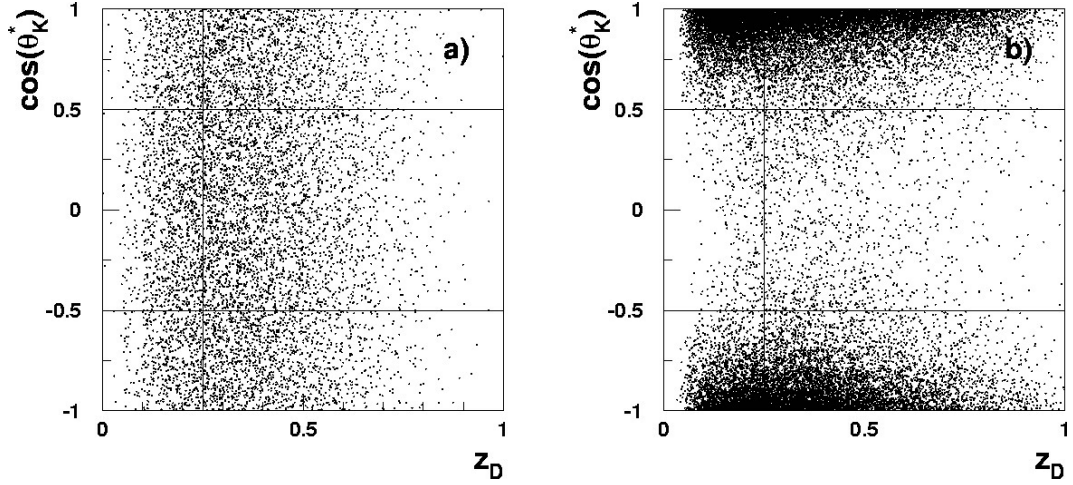


図 2.3: D^0 生成の再構成のための運動学的カット。a) D^0 の崩壊によるイベントの分布、b) 通常の fragmentation によるバックグラウンドイベントの分布を、 $\cos\theta_K^*$ と z_D の関数としてプロットしたもの。図中の直線がカットの境界を示す。

$m_\mu^2 \frac{\nu^2}{E(E-\nu)}$ であり、上限は散乱ミューオンのアクセプタンス $\theta_c < 50$ mrad によって決まり、 $Q_{max}^2 = E(E-\nu)$ である。ここでは、 $35 < \nu < 85$ GeV の全光子エネルギーの範囲で積分したチャーム生成の断面積は 1.9 nb であり、重みをつけて平均をとった減偏極因子は $\bar{D} = 0.66$ である。

仮想光子の全断面積 $\sigma^{\gamma^*N \rightarrow X}$ は、非弾性の実光子断面積 $100 \mu b$ と、Form Factor $(1 + Q^2/M_0^2)^{-1}$ ($M_0^2 = 0.31 \text{ GeV}^2$) を用いて計算できる。(2.6) 式で与えられる仮想光子フラックス Γ を用いて、ミューオンに対する深非弾性散乱の全断面積を計算し、表 2.1 の第 7 列に示した。

2.1.2 オープンチャームの同定

オープンチャームイベントは主に、 $D^0(\bar{D}^0)$ を $D^0 \rightarrow K^- + \pi^+$ ($\bar{D}^0 \rightarrow K^+ + \pi^-$) の崩壊モードによって捕らえ、再構成することにより同定される。このモードの分岐比 (Branching Ratio) は $(4.01 \pm 0.14)\%$ である [47]。チャームイベントのうち、60% は D^0 または $\bar{D}^0$ を伴っているため、このチャンネルでかなり高い確率でチャームイベントを捕まえることができる。

実験では、散乱したミューオンを捕らえた上で、 K と π を検出し、不変質量スペクトルで D^0 のピーク (1864 MeV) を見い出す。このとき、特に問題になるのは、通常の fragmentation で発生した $K\pi$ が偶然の組み合わせで D^0 の不変質量に現われてしまうバックグラウンドである。これらは、運動学的なカットをかけることで十分に減らすことができる。つま

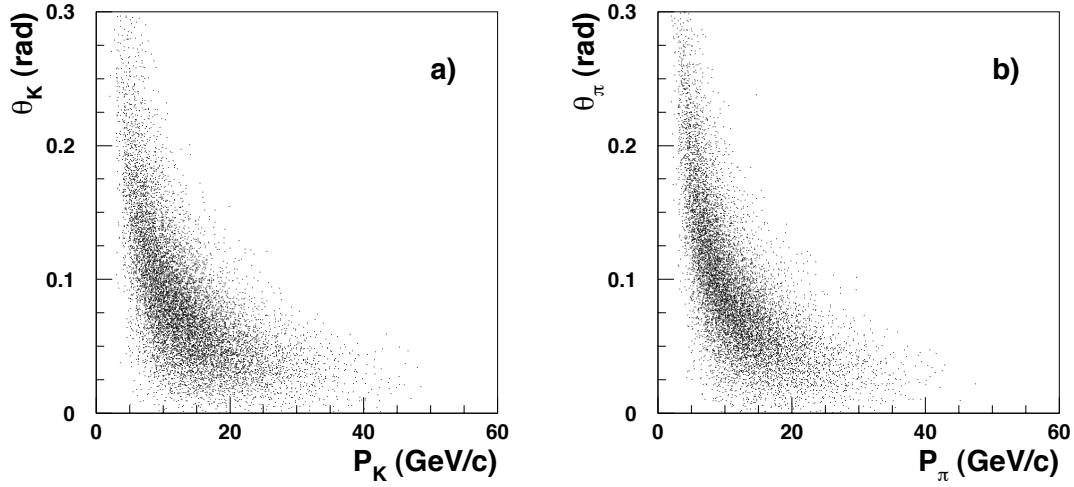


図 2.4: D^0 の崩壊により放出される a) K 、b) π の実験室系での放出角度と運動量の分布。図 2.3 に示した運動学的カットを施して得られたもの。

り、図 2.3 に示したシミュレーションの結果からわかるように、 D^0 からの K 、 π は大角度にも放出されるが、fragmentation からのバックグラウンドは比較的小さな角度に集中する。そこで、 $|\cos\theta_K^*| < 0.5$ でカットをかけ、さらに、 D^0 と仮想光子のエネルギーの比 $z_D = E_D/\nu$ に対して $z_D > 0.25$ というカットを行う。 $K\pi$ の質量分解能は $\sigma_M = 10 \text{ MeV}$ を要求し、 D^0 のウィンドウを $m_D \pm 10 \text{ MeV}$ に設定する。これらの条件によって、バックグラウンドは大幅に抑制されるが、 D^0 の収量は 30% 程度減るだけである。図 2.4 は上記カットを D^0 に施した場合に得られる K 、 π の実験室系での放出角度と運動量の相関を示す。 K 、 π の運動量は 3 GeV より高く、 $\theta_{K,\pi} < 200 \text{ mrad}$ のアクセプタンスが保証されれば、大部分のイベントを検出できることがわかる。

2.1.3 期待される結果

ミューオンプログラムで予想されるルミノシティ $5.0 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に対して、 $35 \text{ GeV} < \nu < 85 \text{ GeV}$ としたとき、20M DIS events/day、82k charm events/day の発生が見込まれる。この中から、再構成される $D^0(\bar{D}^0)$ イベントは、880 events/day である。

これに対し、通常の fragmentation で発生する $K\pi$ が $D^0(\bar{D}^0)$ イベントに見えてしまうバックグラウンドは 3450 events/day となり、 NH_3 で 1 年 (150 日)、 ${}^6\text{LiD}$ で 1.5 年 (225 日) 走り、偏極標的やスペクトロメータの運転効率を 0.25 とすると、全部で 66k の D^0 イベントが最終的に得られる。すると、オープンチャーム生成に対する非対称度の統計誤差は、

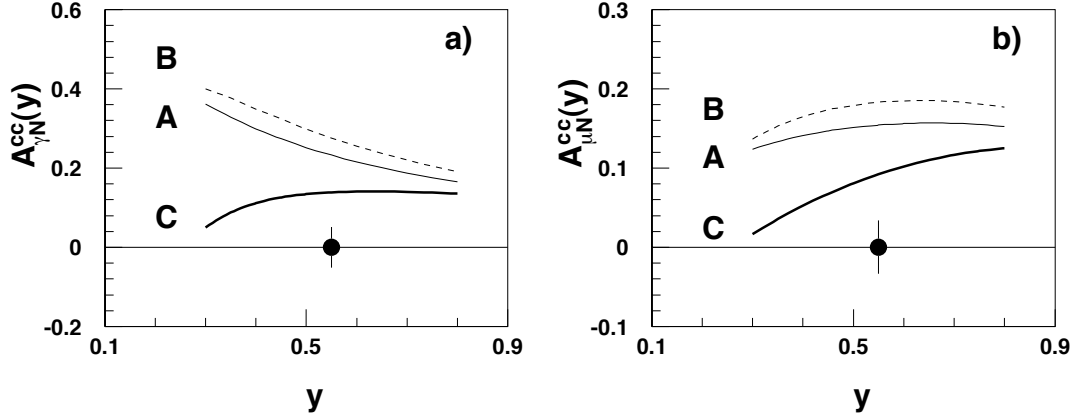


図 2.5: 非対称度の理論的予測と期待される測定精度。オープンチャームにおける非対称度 a) $\delta A_{\gamma N}^{c\bar{c}}$ と b) $\delta A_{\mu N}^{c\bar{c}}$ 。3 種類のセット A、B、C は前出のもの。

シグナルとバックグラウンドの比に依存して

$$\delta A_{\gamma N}^{c\bar{c}} = \frac{1}{P_B \cdot P_T \cdot f \cdot D} \frac{1}{\sqrt{N^S}} \sqrt{1 + \frac{N^B}{N^S}} \quad (2.14)$$

と書けるので、 $\delta A_{\gamma N}^{c\bar{c}} = 0.076$ となり、これはグルーオン偏極に対する sensitivity で、 $\delta(\frac{\Delta G}{G}) \approx 0.21$ に相当する。

さらに、 D^* タギングという方法によって、誤差を減らすことができる。 D^0 の約 30% は $D^*(2010)$ を経由しているので、この方法では $D^{*+} \rightarrow D^0 + \pi^+$ というプロセスを捕捉する。この場合、 $D^*(2010)$ と $D^0(1864)$ は質量差 ΔM がたった 146 MeV しかなく、 D^* の崩壊で生じる π はソフトな π であるので、運動学的な制限が厳しくなる。したがって、質量差に $\Delta M \pm 5$ MeV のカットを施せば、殆どバックグラウンドフリーにすることができる。すると、 $D^0 \rightarrow K^- + \pi^+$ にかかっていた運動学的なカットを緩められるので、減った分の D^0 をかなり回復することができる。結局、非対称度の誤差は改善され、 $\delta A_{\gamma N}^{c\bar{c}} = 0.051$ になる。図 2.5 に、この場合の非対称度の統計誤差を、いくつかの予想値と比較して示した。

この統計誤差に対して、グルーオン偏極に関する sensitivity は $\delta(\frac{\Delta G}{G}) \approx 0.14$ が期待できる。さらに、 D^0 の横方向の運動量に対して $p_T(D^0) < 1.0$ GeV/c のカットをかけると、 D^0 の収量が減るが、PGF 過程のアナライジングパワーが増大するのでグルーオン偏極の sensitivity を向上させることができる。この場合、 $\delta(\frac{\Delta G}{G}) \approx 0.11$ が期待できる。

第3章

COMPASSの実験装置

グルーオンがLO (Leading Order) で関与する過程は極めて稀少な過程であり、前章で議論したCOMPASSのグルーオン偏極度測定で捕らえるべきオープンチャームイベントは、全深非弾性散乱イベントのうちたった0.4%にすぎない。このような稀少な過程に基づいて物理的に意味のある高精度の測定を行うことは実験的に非常に困難であり、実験装置には厳しい要求が課せられる。COMPASS実験はCERN-SPS (Super Proton Synchrotron) のM2 ビームラインに様々な新しい技術を導入した実験装置を構え、測定を行う。本章の各節ではこの実験装置について、各構成要素ごとに解説する。

COMPASSの実験装置においては稀少なイベントを高い統計で捕らえるために、まず高いルミノシティを得ることが本質的に重要である。これは、大強度偏極ミュオンビームと世界最大の固体偏極核子標的システムの使用により実現する。COMPASSでは、M2ビームラインで得られるミュオンビームの最高強度、 2×10^8 muons/spill を用いて測定を行う。偏極標的にはSMCで使用された世界最大の固体偏極核子標的システムと基本的に共通なシステムを使用するが、オープンチャームイベントに基づいたグルーオン偏極度測定に適したビーム運動量 100 GeV/c での測定時に大角度に散乱される K 、 π を捕らえるため、特に大きな開口角 (180 mrad) を持った偏極標的用ソレノイド電磁石が要求され、最終セットアップではこれを用いる。この偏極ビームと偏極標的について、3.1 節に解説する。

前章で議論したように、オープンチャームイベントは、前方に散乱される散乱ミュオンを捕らえると同時に、 $D^0(\bar{D}^0)$ の崩壊で放出される K 、 π を捕らえて同定する。このためのスペクトロメーターには、以下のような性能が必要である。

- (1) 入射ミュオンおよび前方に散乱される散乱ミュオンを捕らえることができる。
- (2) 大きな角度に散乱される K 、 π を捕らえ、粒子識別できる。
- (3) 大強度ビームによる高い計数率に対応する。

COMPASSでは、オープンチャームの同定において重要な鍵となる粒子識別のために大

型の RICH 検出器を配した 2 段構えのスペクトロメーターを組み、この要求を満たす。 K 、 π を捕らえる測定系には、大きな角度アクセプタンスと同時に、 D^0 再構成時の高い質量分解能 (~ 10 MeV) が求められる。このため飛跡測定器の高い位置分解能が重要である。

散乱ミュオンを捕らえる測定系には、オープンチャーム生成において支配的な quasi-real photon イベント ($Q^2 \approx 0$) までを完全に捕らえるために、ビームの通過領域 (ビームスポット) までを隈なくカバーし、ミュオンが最前方 (散乱角度 $\theta \approx 0$) に散乱されるイベントを捕らえることが求められる。入射、散乱ミュオンを捕らえる飛跡測定器には、 10^8 muons/sec という高いビーム強度に対応する高計数率耐性と、ビーム粒子の飛跡とトリガーに起因したミュオンの飛跡を区別するための高い時間分解能が重要となる。

このスペクトロメーターとこれを構成する各検出器については、3.2 節で述べる。なお、本研究の主題であり、私が開発研究を担当したシンチレーティングファイバー (SciFi) トラッカーについては本章では簡単に説明するにとどめ、後の第 4 章、第 5 章、第 6 章に詳しく議論する。

さらに、最前方に散乱されたミュオンまでを捕らえ、大強度ビームによる高バックグラウンド環境での確にイベントの選択を行うためのミュオン・トリガーシステムと、高計数率と大量のデータの収集、転送のために開発された最先端のデータ収集システムについて、それぞれ 3.3 節と 3.4 節に述べる。

3.1 大強度偏極ミュオンビームと偏極核子標的

本節では、COMPASS ミュオンプログラムの最重要課題であるグルーオン偏極度測定で要求される高いルミノシティを得るために本質的に重要な大強度偏極ミュオンビームと、世界最大の固体偏極核子標的システムについて解説する。

3.1.1 偏極ミュオンビーム

COMPASS ミュオンプログラムで使用する 2×10^8 muons/spill の大強度偏極ミュオンビームは、CERN-SPS (Super Proton Synchrotron) の最大 450 GeV/c の 1 次陽子ビームより生成される 3 次ビームである。加速器のサイクルおよびスピル (spill; サイクル中でビームが照射される時間) は当初計画では 14.4 秒の SPS サイクルあたり 2.4 秒スピルとされており、2000 年までに M2 ビームラインで行われた COMPASS のテスト実験はこのサイクルで行われた。2001 年以降の測定では、16.8 秒の SPS サイクルあたり 5.2 秒スピルとサイクルが長くなり、スピルの時間幅も 2 倍以上になった。しかし、いずれの場合もスピルあたりのビーム強度は一定である。

図 3.1 に、ビームラインの模式図を示す。SPS で 450 GeV/c まで加速された陽子は T6 プ

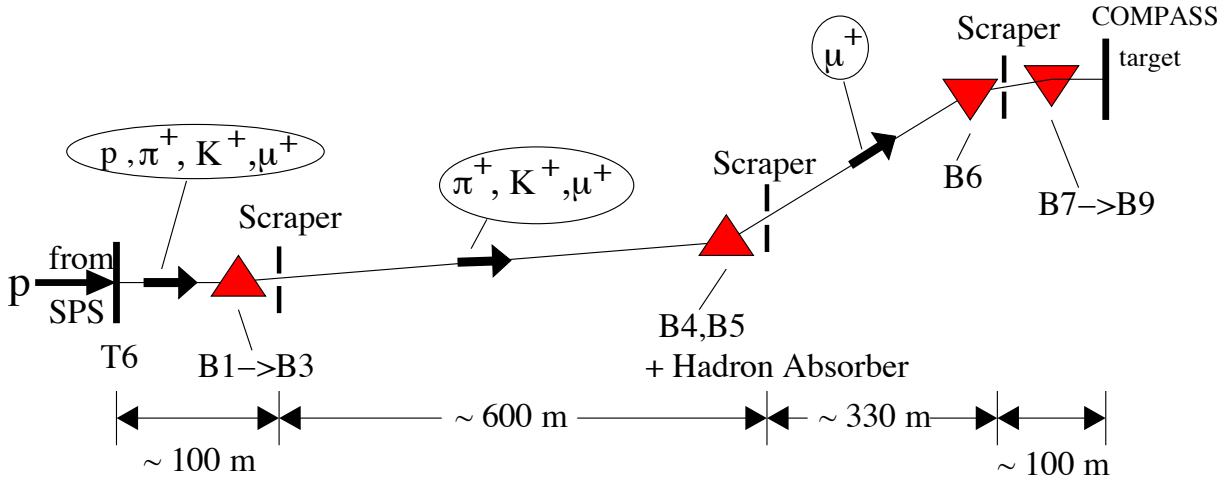


図 3.1: COMPASS 実験で使用する 3 次ミュオンビームを供給する M2 ビームラインの模式図。

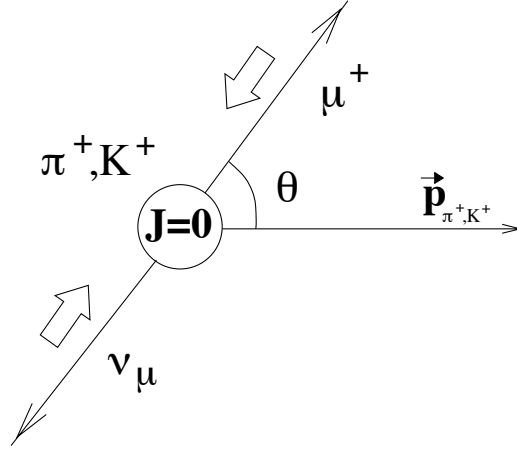
ロダクション・ターゲットと呼ばれるベリリウム標的に入射され、ここで 2 次ビームが生成される。1 次陽子ビームの強度は 10^{13} protons/spill のオーダーである。プロダクション・ターゲットの厚さによって、最終的に得られる 3 次ミュオンビームの強度が決定する。グルーオン偏極度測定に使用する 2×10^8 muons/spill の大強度ビームを得るためには、厚さ 500 mm の標的が使用される。

ミュオンビームの運動量は $100 \sim 200$ GeV/c で選択可能であり、COMPASS の 2001 年と 2002 年の測定では 160 GeV/c のビームが用いられた。そこで、以下の議論ではビーム運動量 160 GeV/c の場合について述べる。

プロダクション・ターゲットで生成された 2 次ビームは B1 から B3 のダイポール偏向電磁石とスクレイパーによって 1 次陽子ビームから分離され、運動量の中心値約 177 GeV/c、ばらつき $\pm 10\%$ (rms) 程度でビームラインに引き出される。スクレイパーは長さ 5 m の磁化した鉄ブロックで作られた特別なコリメーターである。177 GeV/c の 2 次ビームの構成は 65.9% の陽子、3.4% の K、30.7% の π のようになっており、 K/π 比は約 0.11 である。

次に、2 次ビームは長さ 600 m の Decay Channel へと導かれ、ここで π 、K の崩壊によりミュオンが生成される。Decay Channel を通過して残った π 、K は、B4 電磁石と共に設置された長さ 9.9 m のハドロン・アブソーバーによって取り除かれる。このアブソーバーには、ミュオンの多重散乱を抑えるためにベリリウムが使用されている。B4、B5 偏向電磁石とこれに続くスクレイパーにより、運動量 160 GeV/c のミュオンが運動量のばらつき 3% (rms) で選別される。B4、B5 電磁石は地下 15 m に設置されている。

地表に上ってきたミュオンビームは、実験エリアの約 100 m 上流に設置された B6 偏向電磁石でほぼ水平に曲げられ、COMPASS 実験ホールの偏極標的へと向かう。この B6 偏向電磁石と前後に置かれたホドスコープ検出器群により、ビーム運動量分析系 (Beam


 図 3.2: π 、 K のミュオンへの崩壊。

Momentum Station; BMS) が構成されている。

偏極標的に入射するビームの位置、方向、標的上での形状やダイバージェンス等、最終的なビームの調整は B8、B9 偏向電磁石とこれに続くフォーカス用の 4 極電磁石群を用いて行われる。

$\pi(K)$ の崩壊で生じるミュオンビームは、パリティ非保存の性質によって運動量方向に自然に偏極する。実験室系でのミュオンの偏極度は、図 3.2 に示した $\pi(K)$ 静止系での放出角度に依存する。したがって、選択する運動量によって偏極度が決定することになる。ビームのフラックスとエネルギーとの最適化により、COMPASS では前方に放出されるミュオンが選択される。この場合、ミュオンは負方向 (ビームの進行方向と反対向き) に偏極している。このときのミュオンの偏極度は次式で与えられる [48]。

$$P_\mu = -\frac{m_{\pi,K}^2 + (1 - \frac{2E_{\pi,K}}{E_\mu})m_\mu^2}{m_{\pi,K}^2 - m_\mu^2} \quad (3.1)$$

ここで、 E_i と $m_i (i = \pi, K, \mu)$ は、各粒子のエネルギーと質量である。 K の崩壊により生成したミュオンは非常に高い偏極度 ($E_\mu/E_K = 0.91$ で -0.99) を示すが、全体に対する割合は小さく 1% 程度である。160 GeV/c の場合、偏極度は -0.75 程度になる。図 3.3 に、 π の運動量 177 GeV/c の場合のミュオンビームの運動量に対する偏極度の計算結果を示す。

COMPASS では、標的に入射されるビームのスポットサイズを小さくすることが非常に重要である。標的の断面積が小さければ、散乱粒子の標的物質中での多重散乱による運動学変数の誤差を減らし、バーテックス決定精度を向上することができる。COMPASS では、標的中でのスポットサイズとして $\sigma_x \times \sigma_y = 8 \times 8 \text{ mm}^2$ 以下を要求した。標的前後でのビームの形状はシンチレーティングファイバー・トラッカーにより測定され、これを用いてビームの最終的な調整を行う。第 6 章で、2001 年のデータ収集時に測定されたビー

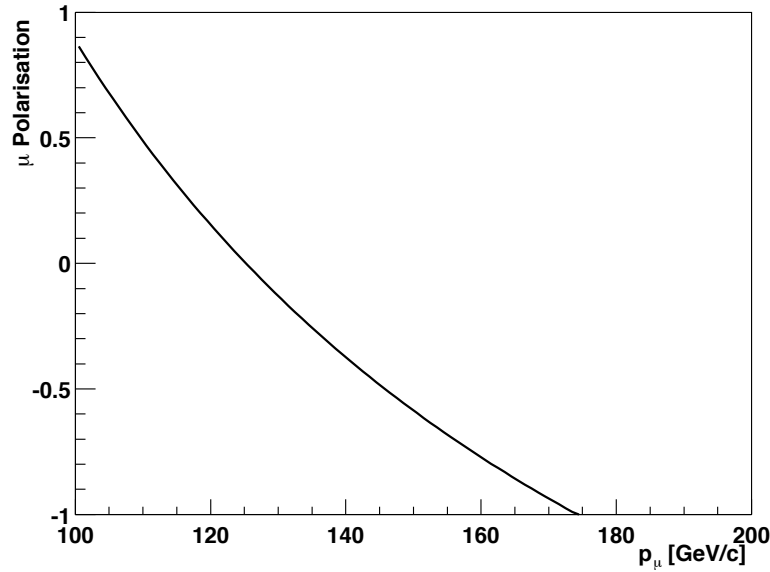


図 3.3: ミューオンビームのハドロン・アブソーバーの下流での運動量に対する偏極度。 π の運動量を $177 \text{ GeV}/c$ として計算したもの。

ムプロファイルと測定されたスポットサイズを示す。

3.1.2 偏極核子標的

偏極標的システム

実験で要求される高いルミノシティを得るために、COMPASS ミューオンプログラムではビームの入射方向に 60 cm の非常に長い標的セルを、前後に 2 つ並べてビームを照射する。この大きな標的を偏極させるために、DNP (Dynamic Nuclear Polarization [49, 50]) を用いた世界最大の偏極標的システムを使用する。DNP は、強磁場と極低温の条件下において、自然に偏極する不対電子の偏極を核子スピンの偏極に移行させる手法である。標的核子の高い偏極度を実現し、これを保つために、冷凍器と電磁石を組み合わせた複雑なシステムが構築される。

COMPASS では基本的に SMC の偏極標的システムと同じものを使用するが、グルーオン偏極度測定のために最適化した実験計画において、オープンチャームイベントで大角度に放出される π 、 K を捕らえるために大口径の超伝導ソレノイド電磁石が要求された。SMC 用電磁石の口径 30 cm に対し、COMPASS 用電磁石の口径は π 、 K に対する十分なアクセプタンスを確保するため 65 cm と大幅に大きくなり、開口角は SMC 電磁石の $\pm 60 \text{ mrad}$ に対し、 $\pm 180 \text{ mrad}$ を持つ。通常、偏極標的用磁場は 2.5 T (テスラ) で 100 ppm 以下の均一度が要求されるが、 1.2 m 以上の領域にわたってこのような条件を満たすのは、口径を大

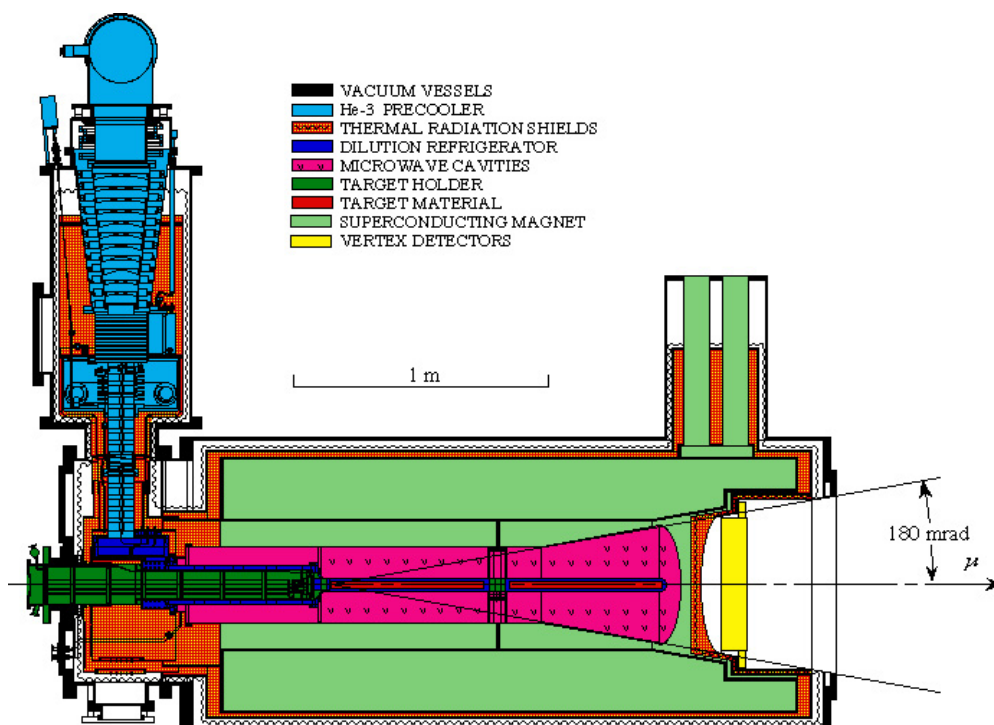


図 3.4: COMPASS 用電磁石による偏極核子標的システム。

きくするに伴い、非常に困難になる。

図 3.4 に、この COMPASS 用電磁石を用いた偏極標的システムを示す。左上の突き出した部分は ^3He - ^4He 希釈冷凍器の予冷部である。この冷凍器は標的セルを最低到達温度 50 mK まで冷却でき、冷却能力は 0.5 K で 1 W と非常に大きい。2 つの標的セルは、16 個の補正コイルを持った超伝導ソレノイド磁石によって 2.5 T、均一度 100 ppm 以下に保たれる。単一の標的セルは長さ 60 cm、直径 3 cm の円筒形である。2 つの標的セルは 10 cm の間隔をあけてビーム入射方向に並べられ、Mixing Chamber 内に挿入されている。Mixing Chamber はマイクロ波の Cavity の中に納められており、2 つの標的セルの間には銅箔製のマイクロ波の隔壁があって、セル毎に異なった周波数のマイクロ波を入射することで独立に偏極させることができる。実験では、前後のセルを互いに反対方向に偏極させる。これによりビームのフラックスの変化等、比較的短い時間に起こる変化の影響を排除して非対称度が測定できる。偏極度は、各セルに 5 個ずつ取り付けられた NMR コイルによって測定される。

この電磁石には、ソレノイドだけでなく鉛直方向の磁場を形成する超伝導ダイポール電磁石も組み込まれている。このダイポールの磁場とソレノイドの磁場を同期して変化させることにより、標的セルに形成される合成磁場を回転させることができる。これにより、標的スピンを反転させることが可能である。スピンの反転は、測定中は基本的に 1 日に 3

回の割合で行われ、前後のセルの偏極方向とビームの偏極方向の組み合わせを反転させる。これで、前後のセルの条件の違い等による系統誤差を排除することができる。

しかしながら、このスピン反転においては、磁場に対する標的スピンの相対的な向きは常に一定である。この系統誤差を排除するために、さらに、マイクロ波の周波数の交換による標的スピンの反転を行う。これには、一旦標的を無偏極の状態にし、再度偏極度を成長させなければならないため、2日から4日程度を要する。この反転は、基本的にビームタイムの半分が終わった時点で1回だけ行われる。

ダイポールによる垂直磁場は、ビームの方向に対して垂直な標的の偏極を必要とする測定 (g_2 測定、transversity 測定等) においても使用される。

2001 年、2002 年の測定においては、偏極標的システムに SMC 電磁石が使用された。この場合でも、磁石の形状(口径、開口角)以外は上に述べた COMPASS 電磁石を用いた偏極標的システムと全く同じである。

標的物質

グルーオン偏極度測定の統計エラーを抑えるためには、高い偏極度が得られ、かつ希釈ファクター (Dilution Factor) の大きな標的物質を使用することが本質的に重要である。

グルーオン偏極度測定においては基本的に陽子標的も重陽子標的も同等に取り扱われるが、COMPASS ミューオンプログラムで計画されている他の様々な研究課題のために、陽子標的として NH_3 、重陽子標的として ${}^6\text{LiD}$ が使用される。当初計画では、 NH_3 、 ${}^6\text{LiD}$ でそれぞれ 1 年、1.5 年の測定が予定された。

特に、 ${}^6\text{LiD}$ は ${}^6\text{Li}$ を $\alpha + \text{D}$ とみなすことができ、DNP で ${}^6\text{Li}$ と D を同時に偏極することができるので、8 つの核子のうち 4 つを偏極させることが可能である。これで、希釈ファクターは $4/8 = 0.5$ と、非常に大きな値になる。偏極度は NH_3 で 90% 以上、 ${}^6\text{LiD}$ で 50% 近くが得られる。しかし、どちらも DNP に必要な不対電子 (フリーラディカル) を低温で電子線を照射して生成しなければならないので、1 リッター近い大量の標的物質を用意するのは非常に大掛かりな仕事になる。

2001 年および 2002 年の測定では、まず偏極度と希釈ファクターの積でより大きな値が得られ、高い精度でのグルーオン偏極度測定が可能な ${}^6\text{LiD}$ を標的物質として使用した。2001 年の測定での偏極標的の運転時には、磁場に対して平行、反平行の偏極方向についてそれぞれ $(+54.2 \pm 1.2\%)$ 、 $(-47.1 \pm 0.8\%)$ の最大偏極度が得られている [51]。これは、実用化された ${}^6\text{LiD}$ 標的としては世界最高水準の偏極度である。

3.2 スペクトロメーター

3.2.1 スペクトロメーターの基本構成

オープンチャーム生成に基づくグルーオン偏極度測定のための COMPASS スペクトロメーターは、次のような性能を備えていなければならない。

- (1) 前方、特に最前方 ($\theta \approx 0$) に散乱されるミュオンを捕らえることができる。
- (2) 40 GeV 程度までの K 、 π を大きなアクセプタンスでかつ高い運動量分解能で捕らえ、粒子識別することができる。
- (3) 10^8 muons/sec という高いビーム強度に対応できる。

このような条件を満たすために、COMPASS では2台の RICH を含む2段のスペクトロメーターを選択した。実験の最終セットアップでは各段共に、スペクトロメーター電磁石、飛跡測定器群、RICH による粒子識別、電磁およびハドロンカロリメーターとミュオン検出系を備えた完全な形になる。このセットアップにより、基本的に上流側のスペクトロメーターと RICH1 で比較的大きな角度に放出される K 、 π を捕らえ、下流側のスペクトロメーターでは散乱ミュオンと高い運動量の K 、 π を RICH2 で識別し、捕らえることになる。そこで、上流側を LAS (Large Angle Spectrometer)、下流側を SAS (Small Angle Spectrometer) と呼ぶ。スペクトロメーターで検出される粒子の運動量は、各段のスペクトロメーター電磁石の作る磁場中での偏向の大きさにより測定される。第1スペクトロメーター電磁石 SM1 と第2スペクトロメーター電磁石 SM2 のベンディングパワーはそれぞれ $1.0 \text{ T}\cdot\text{m}$ と $4.4 \text{ T}\cdot\text{m}$ である。図 3.5 に、2001 年の測定時のセットアップ図を示す。最終セットアップに対して、このセットアップでは電磁カロリメーターと RICH2 が設置されていない。

飛跡測定器群を構成する各検出器に要求される性能は、スペクトロメータ中の Z 座標 (ビーム軸方向の距離) と、カバーする角度アクセプタンスによって異なる。最前方に散乱されるミュオンを捕らえるために、飛跡測定器は大強度ビームのビームスポットまでを完全にカバーしなければならない。一方で、大きな角度に放出される K 、 π を捕らえるためには数 m $\times$ 数 m といった非常に大きな有感領域が必要となる。このような両極端の厳しい要求を同時に満たす飛跡測定器を建設し、使用するのには現実的でない。コストと実験から要求される性能との現実的な妥協点を考えれば、それぞれに特徴を持ったいくつかの互いに相補的な検出器、すなわち、極めて高い計数率に対応する小型の検出器と非常に大きな有感領域を持つ検出器、さらに、それぞれに中間の性能を持つ検出器の組み合わせによって測定系を構成するのが、最善の策である。

第 3 章 COMPASS の実験装置

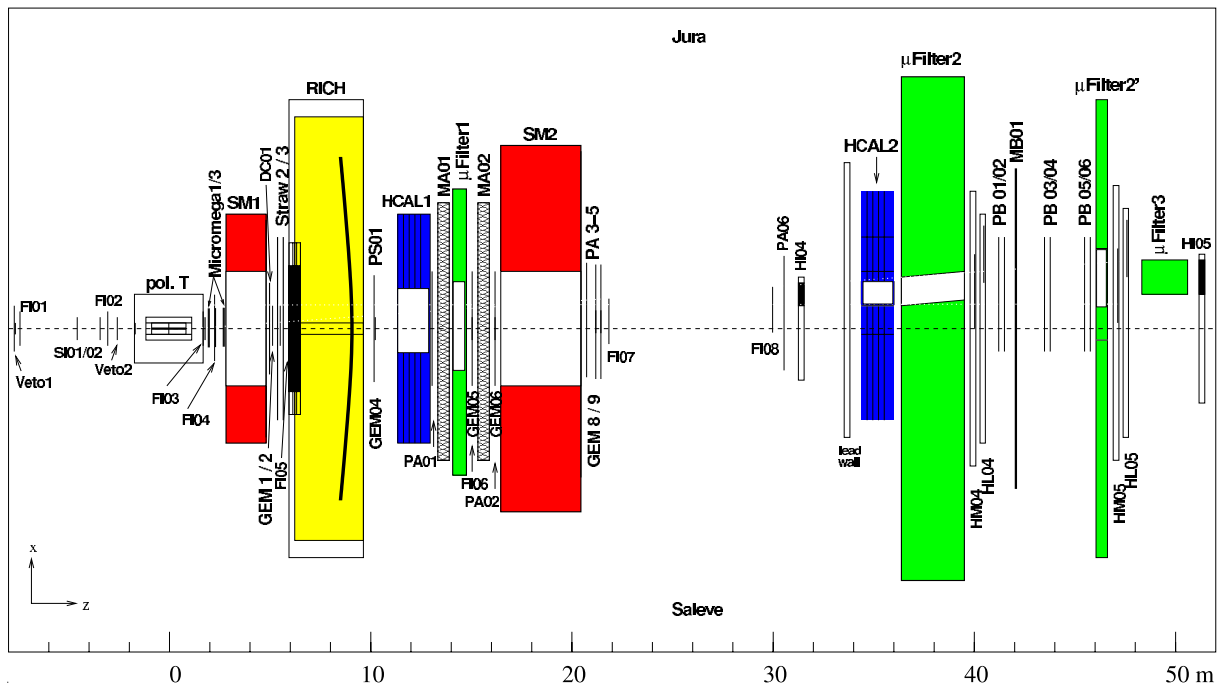


図 3.5: 2001 年の COMPASS スペクトロメータのセットアップ。縦軸のスケールは横軸に示した目盛りとは異なる。

表 3.1: COMPASS 飛跡測定系を構成する各グループ。スペクトロメータ中の異なるセクション、標的上流 (Upstream of PT)、標的-SM1 間 (PT-SM1)、SM1-SM2 間 (SM1-SM2)、SM2 下流 (Downstream of SM2) において各グループを構成する検出器の種類を示した。

Section	VSAT	SAT	LAT
Upstream of PT	SciFi, Silicon	—	—
PT – SM1	SciFi	Micromegas	DC
SM1 – SM2	SciFi	GEM	(DC,) Straw, MWPC
Downstream of SM2	SciFi	GEM	MWPC

そこで、COMPASS では大別して 3 種類の飛跡測定器のグループの組み合わせによる測定系をデザインした。各グループはそれぞれ、VSAT (Very Small Area Tracker)、SAT (Small Area Tracker)、LAT (Large Area Tracker) と呼ばれる。VSAT は最も高い計数率に対応するが、有感領域は非常に小さい。一方で、LAT は極めて大きな有感領域を持ち、比較的計数率の低い領域のみをカバーする。SAT はビームスポット周辺の比較的計数率の高い領域をカバーして、両者の間を埋める。

COMPASS スペクトロメータの各セクションにおいて、この 3 つのグループを構成する飛跡測定器の種類を表 3.1 にまとめた。1 組の完全な飛跡測定器系は、各グループの測

定器 1 種類ずつの組み合わせによって成立する。例えば、SM1 の上流においては LAT にドリフト・チェンバーを用いて大きな角度をカバーし、SAT の Micromegas が中間の領域、VSAT のシンチレーティングファイバー・トラッカーがビーム領域をカバーする。SM1 下流の LAS においては、ストロー・チェンバーが LAT、GEM が SAT、シンチレーティングファイバー・トラッカーが VSAT として使用される。飛跡測定器系を構成するこれらの各検出器については、後の 3.2.3 節により詳しく解説する。

オープンチャームの同定等、Semi-inclusive 深非弾性散乱の解析においては粒子識別が重要な鍵である。反応の終状態のハドロンは RICH によって得られる速度の情報と、運動量測定の結果とを組み合わせることで粒子識別できる。COMPASS において非常に重要な役割を担う RICH について、3.2.4 節で述べる。

RICH の下流にはハドロン・カロリメーターが置かれる。ハドロン・カロリメーターは 2 次粒子の生成を捕らえ、トリガーにも使用される。カロリメーターのさらに下流には、ミュオン・フィルターと飛跡測定器により構成されるミュオン検出系が設置されている。これらについても、以下の節で概説する。ミュオン・フィルターに続くスペクトロメーターの最下流には、トリガー・ホドスコープが設置される。ミュオンプログラムで使用するミュオン・トリガーについては、後の 3.3 節で詳しく述べる。

3.2.2 ビーム運動量分析系 (BMS)

COMPASS で使用するミュオンビームは、例えば 160 GeV/c の運動量の中心値に対して、約 3% のばらつきを持っている。物理の解析を行うためには深非弾性散乱イベントに関与した入射ミュオンのエネルギーを、高い精度で決定しなければならない。そこで、COMPASS では標的から 100 m 上流のビームライン中に設置されたビーム運動量分析系 (Beam Momentum Station; BMS) により、イベントごとに個々の入射ミュオンの運動量を測定する。

図 3.6 に BMS のセットアップ図を示す。BMS は、3.1.1 節で述べたビームライン中の B6 偏向電磁石と前後に 2 ステーションずつ設置されたホドスコープ検出器群により構成される。3.1.1 節に述べたように、B6 は鉛直方向にビーム粒子を偏向する。したがって、BMS の各ホドスコープは高さ 5 mm、厚さ 20 mm を持つ多数の水平なシンチレーター・ストリップにより構成され、鉛直方向の飛跡位置測定を行う。それぞれ 2 ステーションの使用により B6 の前後で飛跡の傾きを測定し、偏向の度合いから運動量が決定できる。

ビームスポットの大きさは各ステーション上でかなり差があるので有感領域の大きさもそれぞれで異なっている。チャンネル当たりの計数率を下げるために、各ステーションの中心付近のストリップはビームのフラックスに応じて水平方向にも 2 から 4 分割され、独立に読み出される。

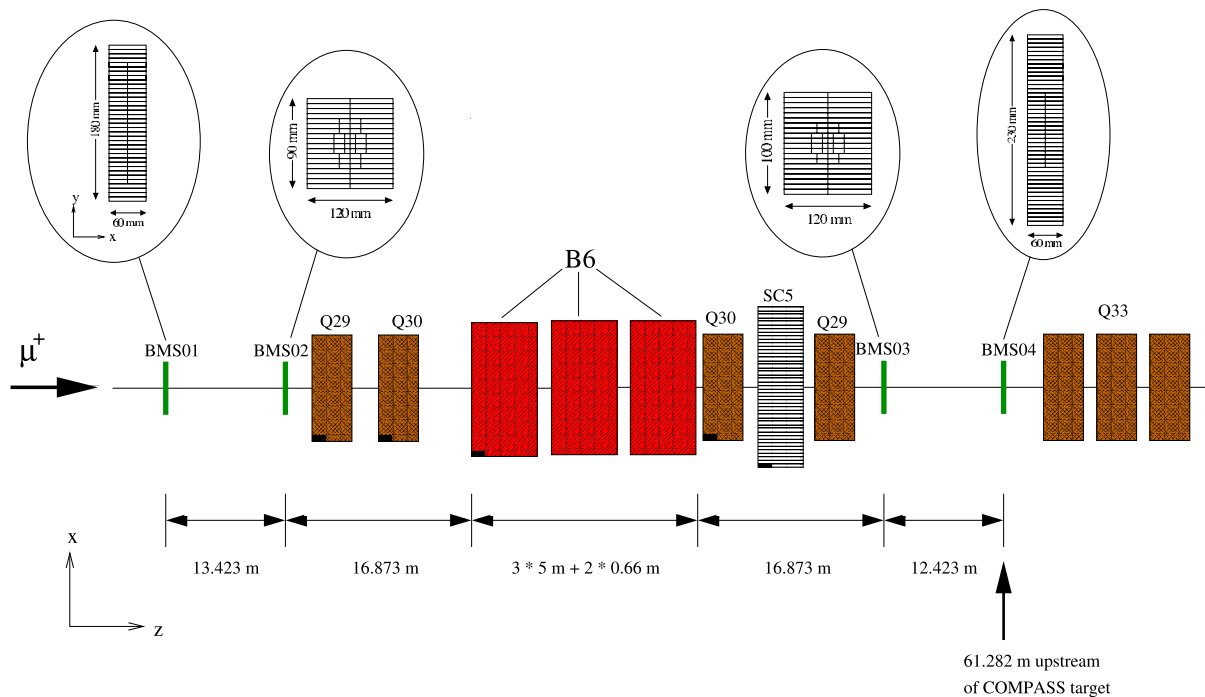


図 3.6: BMS のセットアップ図。

BMS はかなり厚いシンチレーター・ストリップを使用しているので非常に高い時間分解能を持ち、約 262 ps (rms) が得られている。この高い精度で決まる時間情報に基づいて、BMS の測定データと、トリガーイベントとの関連付けが行われる。

3.2.3 飛跡位置測定器群

シンチレーティングファイバー・トラッカー

VSAT 系は、スペクトロメーターの全域において主にシンチレーティングファイバー (SciFi) トラッカーで構成される。COMPASS では標的の下流のスペクトロメーター中に、ビーム軸に沿って標的直後から約 30 m 下流まで 6 台の SciFi トラッカー・ステーションを設置し、使用する。また、標的上流にも 2 ステーションを配置して入射ビームの飛跡測定を行う。

VSAT は非常に小さな散乱角度での飛跡測定に使用される。特に、グルーオン偏極度測定で調べるオープンチャーム生成では散乱ミューオンが最前方 ($\theta \approx 0$) に放出されるイベントが支配的である。このため VSAT にはビームスポットを直接カバーできる性能が要求され、高計数率環境での安定な動作と共に、特に高い時間分解能が重要となる。さらに、放射線耐性が高いことも重要な要素である。

シンチレーティングファイバーを用いたホドスコープ検出器は、これらの要求を満たすことができる。SciFi トラッカーについては、第4章、第5章、第6章で詳しく述べる。

シリコンマイクロストリップ検出器

VSAT 系を構成するもう一つの検出器は、シリコンマイクロストリップ検出器である。COMPASS ミューオンプログラムではこの検出器は標的上流にのみ設置され、ビーム粒子の飛跡測定に使用される。

COMPASS 用シリコンマイクロストリップ検出器の各ステーションは、 $\pm 5^\circ$ に傾けた2プレーンで構成される。有感領域となるシリコンウェハーの大きさは $5 \times 7 \text{ cm}^2$ である。各プレーンで同時に直交する2方向の読み出しを行うことができる。したがって、1ステーションで4方向の飛跡位置測定を行う。

このシリコンマイクロストリップ検出器は $14 \mu\text{m}$ という極めて高い位置分解能を持つ。時間分解能も 3 ns 程度とかなり高いが、単体で VSAT として使用するには十分ではない。したがって、COMPASS では高時間分解能を持つ SciFi トラッカーを中心に VSAT を構成し、高い位置分解能を持つシリコンマイクロストリップ検出器を併用することで、標的上流でのより高精度での飛跡位置測定を行う。

Micromegas

ビームスポット周辺の $40 \times 40 \text{ cm}^2$ 程度までの領域をカバーする SAT グループは、比較的大きな有感領域を持つ最先端の高計数率型ガスチェンバーによって構成される。 $2 \times 10^8 \text{ muons/spill}$ の大強度ビームの使用により、ビームスポット周辺の領域でもビームハローや2次生成粒子のフラックスはかなり高くなっている ($\sim 3 \times 10^5 \text{ particles/cm}^2 \cdot \text{s}$)。また、 K 、 π の飛跡位置測定に重要な役割を果たす SAT には、最終的な D^0 の不変質量分解能 $\sim 10 \text{ MeV}$ を実現するために $100 \mu\text{m}$ 以下の高い位置分解能が要求される。同時に、これらの検出器はスペクトロメーターのアクセプタンスのかなり大きな面積をカバーするため、アクセプタンス中の物質量を極力低く抑えなければならない(検出器あたり放射長の 0.35% 以下)。

SM1 上流で SAT として使用される Micromegas 検出器 (Micromesh Gas Structure detector) は、アノードストリップと、非常に近傍 ($100 \mu\text{m}$) に配置したメッシュ状のカソード電極との間に生じる非常に強い電場によって増幅を行う全く新しい発想のガスチェンバーである。図 3.7 に、Micromegas 検出器の構造図を示す。増幅領域を Micromesh と PCB 間の狭い領域に閉じ込めることで、ドリフトの遅い陽イオンの吸収を高速で行う。ガスは高速ドリフトに最適化した $\text{Ne-C}_2\text{H}_6\text{-CF}_4$ の混合ガスを用いる。

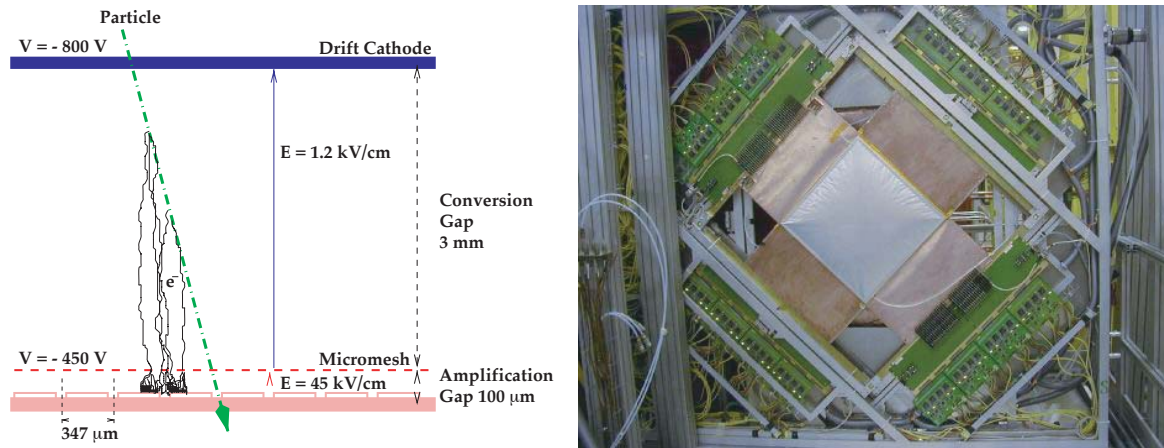


図 3.7: (左) Micromegas 検出器の構造図と動作原理。(右) 実験エリアに設置された Micromegas 検出器 UV プレーン。

Micromegas の有感領域は $40 \times 40 \text{ cm}^2$ の大きさを持つ。ビームの通過する直径 5 cm の領域 (ビームカラーと呼ばれる) には独立に高電圧を印加することが可能であり、低い強度のビームを使用する特別な測定以外ではこの領域の高電圧はカットされている。読み出し用アノードストリップは厚さ $100 \mu\text{m}$ 、大きさ $60 \times 120 \text{ cm}^2$ の大きなプリント基板上に形成されている。このストリップは厚さ $15 \mu\text{m}$ で、ピッチは $347 \mu\text{m}$ である。

Micromegas はストリップの方向が互いに直交するように背中合わせにされた 2 プレーンを 1 単位としている。1 ステーションは XY プレーンと、これに対し 45° 傾けられた UV プレーンによって構成され、X(0°)、Y(90°)、U(45°)、V(-45°) の 4 方向の飛跡位置測定を行う。図 3.7 に、実験エリアに設置された Micromegas(UV プレーン) の写真を示す。COMPASS のテスト実験において、位置分解能約 $70 \mu\text{m}$ 、時間分解能 10 ns 以下が得られている [52, 53]。COMPASS では、偏極標的と SM1 の間に 3 ステーションの Micromegas を設置して使用する。

GEM

SM1 の下流において、SAT 系は多数の GEM (Gas Electron Multiplier) 検出器により構成される。COMPASS 実験用 GEM 検出器はトリプル GEM の構造を持つ。

図 3.8 にトリプル GEM 検出器の構造図を示す。GEM 検出器は読み出し用のアノード電極の周辺に強い電場を形成してガス増幅する通常のガスチェンバーと異なり、アノード-カソード間に配置された増幅専用のメッシュ状電極、GEM によって増幅を行う。アノード電極は基本的に電子の収集、信号の読み出しだけを行う。GEM フォイルには直径 $70 \mu\text{m}$

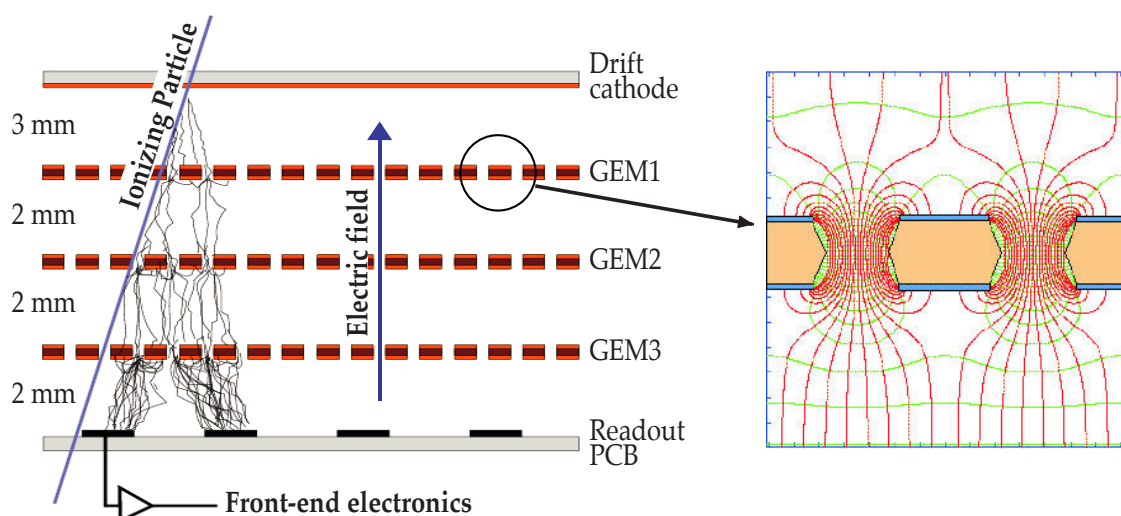


図 3.8: GEM 検出器の構造図と動作原理。COMPASS では3 段の GEM を配置したトリプル GEM 検出器が使用される。GEM フォイルに空けられた穴の中には右の図に示したように強い電場が形成される。電子はこの電場によって穴を通過する際に加速を受け、ここでガス増幅が行われる。

の穴が多数空けられており、両面にかけられた電位差により穴の中に強い電場が形成される。この電場によって、ドリフト中の電子が穴を通過する際に加速を受け、ガス増幅が行われる。トリプル GEM では3 段の GEM に段階的に電位差をつけ、3 段階の増幅を行う。

GEM 検出器の有感領域は $30 \times 30 \text{ cm}^2$ であり、有感領域中央の、ビームの通過する直径 5 cm の領域は Micromegas 同様独立に印加電圧をカットすることができる。読み出し用の PCB（プリント基板）上には直交する 2 方向の読み出しストリップが配置され、1 プレーンで 2 次元の飛跡位置測定が可能である。GEM 検出器の 1 ステーションは 2 プレーンを 45 度傾けて重ねることにより、 $X(0^\circ)$ 、 $Y(90^\circ)$ 、 $U(45^\circ)$ 、 $V(-45^\circ)$ の 4 方向の飛跡位置測定を行う。GEM 検出器では位置分解能約 $40 \mu\text{m}$ 、時間分解能約 15 ns が得られている [54, 55, 56]。

ドリフト・チェンバー

SM1 上流において、Micromegas チェンバーの外側の領域をカバーする LAT は高計数率型のドリフト・チェンバー (DC) である。有感領域は $1.2 \times 1.2 \text{ m}^2$ の大きさを持ち、ビームスポットとその周辺の直径約 30 cm の領域は独立に高電圧をカットできる。ガスは $\text{Ar-C}_2\text{H}_6\text{-CF}_4$ の混合ガスを使用している。1 台の DC ステーションは 8 プレーンから成り、 $X(0^\circ)$ 、 $Y(90^\circ)$ 、 $U(20^\circ)$ 、 $V(-20^\circ)$ の 4 方向に各 2 プレーンの構成になっている。1 ステーション中で同じ方向の測定を行う 2 プレーンは、ワイヤーのピッチ 7 mm に対して互いにピッチ

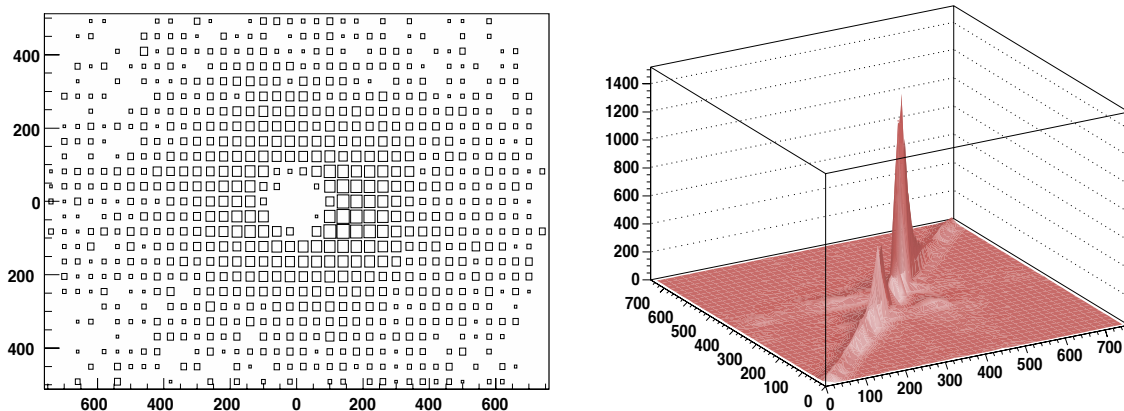


図 3.9: MWPC による飛跡位置測定結果の例。(左)MWPC の 1 ステーション上での 2 次元のイベント分布。(右)MWPC のある 1 ステーション内の 3 プレーンを使用して得られた飛跡位置の相関プロット。3 プレーンのうち 2 プレーンで検出されたヒットから再構成した飛跡位置と、残りの 1 プレーン上で検出されたヒットの位置との相関をとったもの。

の半分、3.5 mm ずらして配置されている。異なる方向を測定するプレーンのカソード間には 10 mm の間隔があげられている。プレーンあたりの位置分解能は約 $150 \mu\text{m}$ と非常に高く、8 プレーンの使用により、1 ステーションでの位置分解能は $70 \mu\text{m}$ 程度にもなる。

ストロー・チェンバー

LAS において、SM1 の下流で LAT として使用されるストロー・チェンバーの各プレーンは、直径 6 mm と 9 mm の細いドリフト・チューブで構成されている。ストロー・チェンバーは高い位置分解能と比較的高い計数率を非常に大型の有感領域 ($3 \times 2 \text{ m}^2$ 以上) で実現している。ビーム領域に近い有感領域の中央部分では 6 mm の細いチューブを使用し、高計数率に対応している。ドリフトチューブはダブルレイヤー構造に組み上げられ、3 ダブルレイヤーで XYU、または XYV の 3 方向の位置測定を行う 1 サブモジュールを構成する。U(V) 方向を測定するダブルレイヤーは (-10°) に傾けられている。ストロー・チェンバーの 1 ステーションは 2 台のサブモジュールで構成され、XYU、XYV の 6 方向の測定を行う。

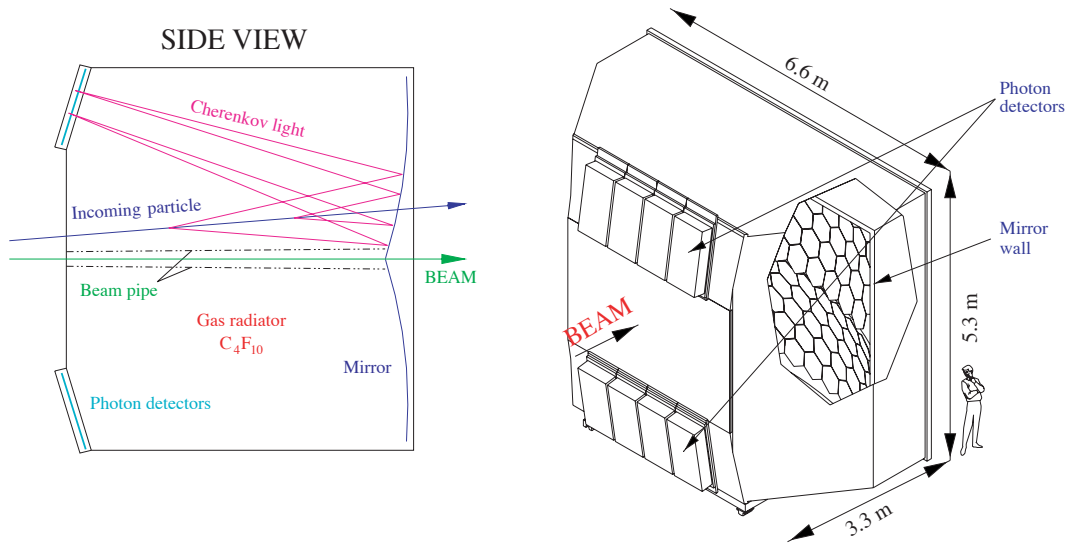


図 3.10: RICH 検出器。

MWPC

SM1 の下流では、10 台の MWPC (Multi Wire Proportional Chamber) ステーションが LAT として使用される。各 MWPC プレーンはワイヤー・ピッチ 2 mm、カソード面とアノードワイヤーの距離は 4 mm の構造を持つ。有感領域の大きさは $1.5 \times 1.2 \text{ m}^2$ であり、ビーム周辺のデッドゾーンは各ステーションの Z 方向の位置によって直径 16 cm から 22 cm になっている。各ステーションの構成はスペクトロメーター中の位置によって異なり、A、A*、B の 3 タイプがある。タイプ A は、X(0°)、U(10°)、V(-10°) の 3 プレーンを持ち、A* はこれに Y(90°) を加えた 4 プレーンを持つ。タイプ B の各ステーションは、XU または XV の 2 プレーンを持つ。

COMPASS-MWPC は高計数率に対応するため、 CF_4 を用いて高速ドリフトに最適化した混合ガスを使用する。また、大量のチャンネルを高計数率で読み出すために専用の Front-End 回路が開発された [57]。図 3.9 に、COMPASS のテスト実験で MWPC から得られた飛跡位置測定結果の例を示す。

3.2.4 RICH

RICH (Ring Image CHerenkov) 検出器は、放射媒質 (radiator) 中を荷電粒子が通過する際に生成されるチェレンコフ光の放出角度から、粒子の速度を直接測定することができる。スペクトロメーターで測定される粒子の運動量と、RICH で測定する速度の相関をとることにより、粒子の質量、すなわち種類を特定することができる。

COMPASS の最終セットアップでは、LAS、SAS の双方に各 1 台の RICH 検出器が建設される予定である。RICH1 で粒子識別可能な粒子の運動量の下限值は、それぞれ π 、 K 、 p に対して 2.5、8.9、17.0 GeV/c と低く、下流側の RICH2 ではそれぞれ 4.4、15.5、29.5 GeV/c となっている。

2002 年のデータ収集の時点では RICH1 のみが建設されており、実験で使用されている。RICH1 は radiator として C_4F_{10} ガスを使用している。荷電粒子の通過によって radiator 中で生成されたチェレンコフ光は 120 個の鏡によって反射され、光検出デバイス上に速度に応じた一定の半径を持つリング状に集光されて、検出される。RICH1 で使用されている光検出器は CsI を光電面とした MWPC で、 $8 \times 8 \text{ mm}^2$ のパッドで信号が読み出される。RICH1 では 60 GeV/c 程度までの π 、 K 、 p の識別を行う。

3.2.5 カロリメーター

COMPASS の最終セットアップでは、2 台の電磁カロリメーター (ECAL) と 2 台のハドロン・カロリメーター (HCAL) が、LAS と SAS にそれぞれ 1 台ずつ設置される予定になっている。2002 年のデータ収集の時点では、HCAL1 と HCAL2 のみが完全な形で使用されており、ECAL は使用されていない。したがって、2 台の HCAL についてのみ、以下に記述する。ECAL1 と ECAL2 は、それぞれ対応する HCAL のすぐ上流に設置され、光子または電子によって生成される電磁シャワーが HCAL に入射するのを防ぐ役割も担う。ECAL2 がインストールされていないため、この目的で HCAL2 の上流に厚さ 10 cm の鉛の壁が設置されている。

ハドロン・カロリメーター

HCAL1 と HCAL2 は共にマトリクス状のセル構造を持つ。HCAL1 は $4.2 \times 3.0 \text{ m}^2$ の有感領域に、 28×20 個のセルを持つ。HCAL2 は $4.4 \times 2.0 \text{ m}^2$ の有感領域で、セルは 22×10 個のマトリクスに配置される。セルの大きさは、HCAL1 と HCAL2 でそれぞれ $15 \times 15 \times 100 \text{ cm}^3$ 、 $20 \times 20 \times 120 \text{ cm}^3$ である。

HCAL1 の最も重要な役割は、チャームバリオンの崩壊によって生じる中性子の検出である。このため高い位置分解能が得られるように最適化したデザインになっている。期待される位置分解能の値は、各セルの端と中央において、標準偏差 (rms) でそれぞれ 4 mm、14 mm である。一方で、HCAL2 は高いエネルギー分解能を得ることに重点が置かれている。最小電離粒子 (MIP) に対するエネルギー損失の平均値は、HCAL1 と HCAL2 でそれぞれ 4 GeV と 2 GeV である。

3.2.6 ミューオン検出系

LAS、SAS の各スペクトロメーターの最下流にはミューオン検出系が配置されている。ミューオンはその貫通力の高さによってハドロンと識別できる。したがって、ミューオン検出系はハドロンを取り除くフィルター (Muon Filter; MF) と、フィルターを通過してきた粒子、すなわちミューオンを捕らえる飛跡測定器 (Muon Wall; MW) によって構成される。

LAS において、ミューオン検出系は MF1 と MW1 とで構成する。MF1 は厚さ 1 m の鉄であり、MF1 を挟むようにして上流、下流に各 1 台の MW1 ステーションが設置されている。MW1 には PIT (Plastic Iarocci Tube) 検出器が使用されている。

後段のスペクトロメーター SAS には MF2 が設置され、その下流に 2 台の MW2 ステーションを設置して使用する。MF2 も鉄のフィルターであり、厚さは 2 m である。MW2 の各プレーンは直径 3 cm の多数のドリフト・チューブで構成されている。ドリフト・チューブはダブルレイヤーに組み上げられ、6 面のダブルレイヤーで 1 台の MW2 ステーションが構成される。MW2 の有感領域は約 $4 \times 2 \text{ m}^2$ の大きさを持つ。

MW2 に続いて、MF2' と MF3 が置かれている。これらのフィルターは SAS の最下流に置かれるトリガーホドスコープの前に配置され、特に MF2 のビーム通過領域にあげられた穴を通過してきたハドロンがトリガーホドスコープに入射するのを防ぐ役割を担っている。MF2' は厚さ 50 cm のコンクリートで組み上げられている。MF3 は鉄でできており、ビーム領域の最近傍に設置される最下流のトリガーホドスコープ、HI05 の直前に配置され、ビームハローや 2 次生成ハドロンを取り除く。

3.3 ミューオン・トリガー

COMPASS のミューオンプログラムで使用するミューオン・トリガーは、専用のトリガー・ホドスコープとハドロン・カロリメーターの情報に基づいてイベントの選択を行う。本節ではミューオン・トリガーのセットアップとイベント選択の基本概念を記述する。

ミューオン・トリガーのシステムは、大別して 2 種類に分けられる。その一つはグルーオン偏極度測定のための quasi-real photon トリガーであり、もう一つはその他の核子スピン構造研究課題のためのイベントを収集する包括的深非弾性散乱トリガーである。

COMPASS ミューオンプログラムでは多様な研究課題に対応するため、幅広い運動学的領域において、深非弾性散乱の測定を行う。これらのイベントは、その反応の運動学変数の領域によって、4 種類の互いに独立なトリガークラスにより捕らえられる。この 4 種類のトリガークラスはそれぞれ IT (Inner Trigger)、LT (LadderTrigger)、MT (MiddleTrigger)、OT (OuterTrigger) と呼ばれる。図 3.11 に、それぞれのトリガークラスによりカバーする運動学変数 y 、 Q^2 の領域を表す。

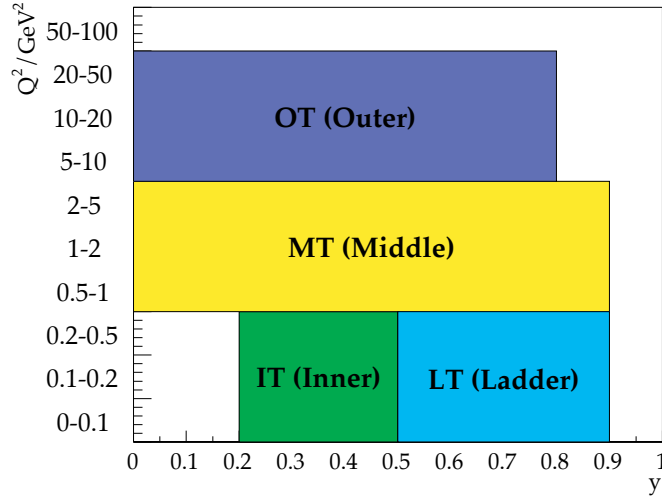


図 3.11: 各トリガークラスによりカバーされる運動学的領域。

3.3.1 Quasi-real photon トリガー

PGF (Photon-Gluon Fusion) 過程に基づいたグルーオン偏極度測定では、quasi-real photon イベント、すなわち $Q^2 \approx 0$ のイベントを捕らえなければならない。このとき、十分な光子の偏極度を保証するために、入射ミュオンのエネルギーに対する仮想光子のエネルギーの割合 y について $y = \nu/E > 0.3$ のイベントのみを選択する。この領域は、IT (Inner Trigger)、LT (Ladder Trigger) の2つのトリガークラスによりカバーする。

標的中で散乱されエネルギーを失った散乱ミュオンは、スペクトロメーター電磁石の磁場によってエネルギーに応じて曲げられ、ビーム粒子から分離される。この分離されたミュオンを捕らえ、磁場による偏向の度合いを測定することで、エネルギー損失を決定することができる。しかし、磁石の下流ただ1点での飛跡位置の測定だけでは、イベントの選択には不十分である。特に興味のある小さな y の領域においては、標的中の多重散乱による偏向と、磁場による偏向とが同程度に見えてしまう可能性がある。この2種類の偏向の影響は、磁石の下流の異なる2点においてX軸方向の飛跡位置を測定することで分離することが可能である。このため、各トリガークラスはそれぞれに属する2台のホドスコープで構成される。図 3.12 に、ミュオントリガーのセットアップを示した。

図 3.13 に示すように、標的中で深非弾性散乱によってエネルギーを失ったミュオンは2台のトリガーホドスコープ上での飛跡検出位置の相関をとったときに、偏向の度合いに応じてある特定の領域に現れる。したがって、トリガー・マトリクスによって適切な組み合わせを選択することで、興味のあるイベントを選択することができる。

Quasi-real photon トリガーを構成する IT クラス、LT クラスにおいては、深非弾性散乱

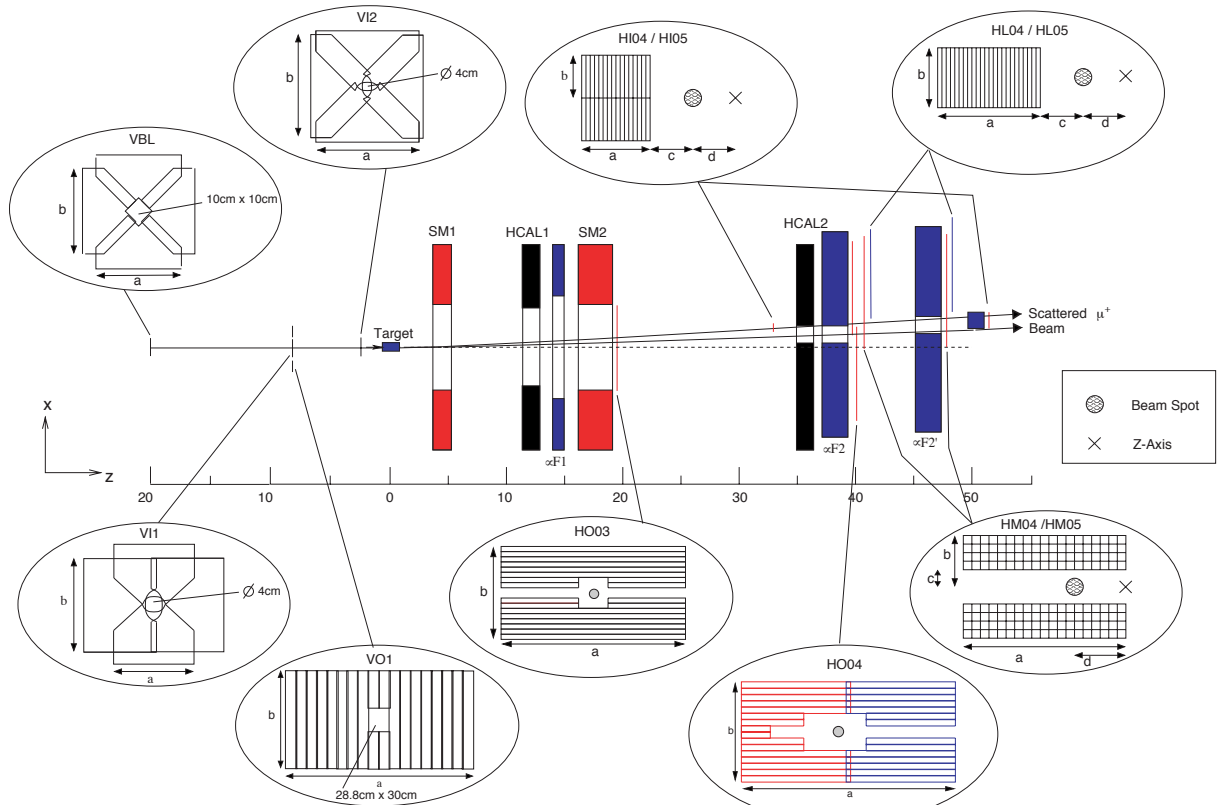


図 3.12: COMPASS ミューオントリガーのセットアップ図。

イベント以外に高エネルギーの光子、Möller 散乱 (μ^+e^-)、低エネルギーのビームハロー等によるかなりのバックグラウンドが検出される。そこで、ハドロン・カロリメーター中にある閾値以上のエネルギー損失を要求することで、2 次生成粒子を伴う深非弾性散乱を特定し、これらのバックグラウンドを抑制する。

3.3.2 包括的深非弾性散乱トリガー

包括的深非弾性散乱の解析に必要な幅広い x の領域をカバーするため、このトリガーにおいては $Q^2 > 1 \text{ GeV}^2$ を要求する。この領域をカバーするトリガークラスは MT (Middle Trigger) と OT (Outer Trigger) である。IT、LT と同様に、これらのトリガークラスも各 2 台のホドスコープにより構成する。MT クラスの 2 台のホドスコープは各 X、Y 方向の 2 プレーンを持ち、2 次元の位置測定ができる。これにより標的中の多重散乱と磁場による偏向との区別を行うだけでなく、1 次トリガーの段階で、検出されたミューオンの飛跡が標的を通過していることを確認することができ、より厳密なイベント選択が可能である。

4 種類のトリガークラスに共通するバックグラウンドとして、ビームハローのミューオ

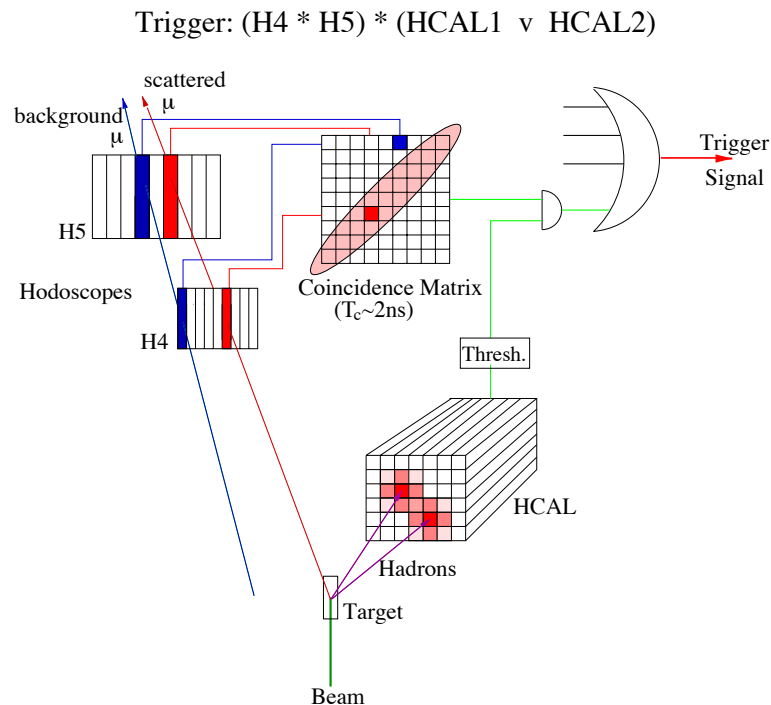


図 3.13: トリガー・マトリクスコンセプト。

ンが、たまたま散乱ミュオンに混じって検出されてしまうイベントが考えられる。このバックグラウンドを排除するために、VETO システムが使用される。VETO としては、専用のトリガーホドスコープを用いたシステムの他に、SciFi トラッカー SF1、SF2 の Y プレーンのラストダイノード信号を使用した SciFi-VETO も使用される。SciFi-VETO では、SF1 の上方 (下方) と SF2 の下方 (上方) とで同時計測があったイベント (Y 方向に大きすぎる傾きを持ったビームハロー) を排除する。VETO システムはトリガーの purity を向上させることが確認できたので、最終的に全てのトリガークラスに VETO との anti-coincidence が組み込まれた。

各トリガークラスによって生成された信号は TCS (Trigger Control System) に送られ、ここで最終的なトリガー信号が生成される。データ収集において、このトリガー信号の振る舞いはどのクラスによって生成されたかにはよらないが、物理解析のために、データにはどのクラスによって生成されたトリガーであるかの情報が残される。また、信号の生成時間は、トリガークラスごとに独立に測定、記録される。

3.4 データ収集システム

COMPASSのグルーオン偏極度測定に必要な高い統計を得るためには、高いイベントレートに対応するFE (Front-End) 回路を含めた最先端のデータ収集システム (Data Acquisition system; DAQ) が要求される。

ミュオン・プログラムでは、 2×10^8 muons/spill の大強度ビームの使用により最大で約 100 kHz のイベントレートが予想される。COMPASS のスペクトロメーターは全長が 50 m 以上あり、さらにその 100 m 上流に位置する BMS を含めると、全測定系を構成する多種多様な各検出器は、互いに最大で約 150 m 離れて分散して配置されている。これら各検出器の読み出しチャンネルは、合計で約 25 万チャンネルに及ぶ。このように分散した大量のチャンネルから得られるデータをイベントごとに統合し、高計数率でのデータ収集を行うために、COMPASS では各検出器に直接装着、もしくはすぐ近傍に配置した"知的な"FE 回路の使用と段階的なイベント構成 (Event Building) の手法に基づいた DAQ システムを開発した。このシステムはまた、各検出器に課せられる異なる要求に対応する柔軟性と、COMPASS の多様な実験課題と長期的な実験装置のアップグレードに対応する拡張性を合わせ持つ。

COMPASS の飛跡測定器の殆どは、FE 回路に TDC (Time to Digital Converter) を用いて検出された信号の時間測定を行うが、特に SciFi トラッカー、BMS で使用する TDC にはチャンネルあたり最大で数 MHz という高計数率での 100 ps 程度の高い精度での時間測定が要求される。そこで、パイプラインでのデータ読み出しにより不感時間のない測定を実現する高時間分解能の TDC チップの開発が、DAQ システムの開発と並行して行われた。この TDC チップは様々な使用モードの切り替えにより、例えば MWPC、PIT 等では時間測定の精度がそれほど重要でない代わりに大量のチャンネルを安価に読み出すことが要求される、といった COMPASS の多種多様な検出器の異なる要求に対応できる柔軟性を持つ。

本節ではまず DAQ システム全体の構成を解説し、次に、本研究の主題である SciFi トラッカーのデータ収集に使用される新開発の TDC チップについて詳しく説明する。さらに、FE 回路と DAQ とを接続するインターフェースとして COMPASS のほぼ全ての検出器で使用する CATCH モジュール [58] について解説する。

3.4.1 データ収集システムの構成

図 3.14 に COMPASS-DAQ システムのブロック図を示す。各検出器から得られた信号は、検出器に直接装着、もしくはすぐ近傍に設置された FE 回路ボード上で時間、信号波高等を測定してデジタル処理され、データ化される。高計数率でのデータ収集にとって大

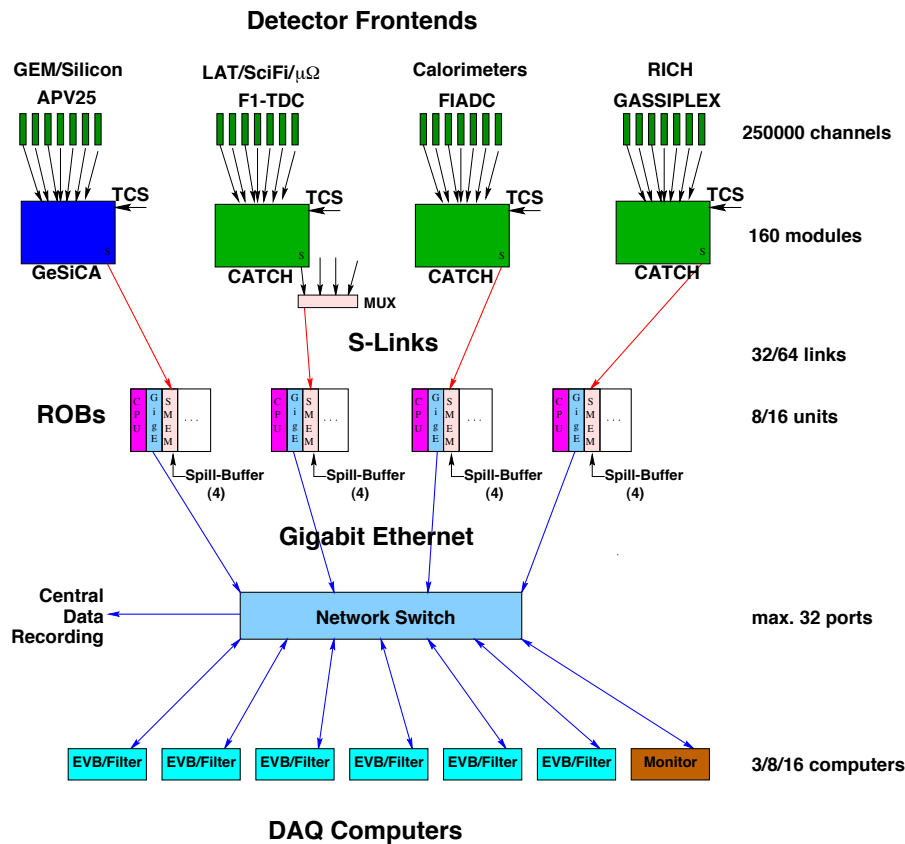


図 3.14: DAQ システムのダイアグラム。

きな問題となる、測定において意味のないデータを早い段階で排除するために、FE 回路におけるデジタル化の段階で、ある程度データの選別を行う。すなわち、アナログ測定回路 (ADC) の場合、ペDESTAL の引算を行い、有為な信号が検出されなかったチャンネルのデータは無視される。TDC では、FE ボード上でトリガー信号と時間相関のあるヒットのみが選択される (トリガーマッチング、3.4.2 節参照)。これらにより、後段の DAQ システムに転送されるデータ量を顕著に減らすことができる。

このために、各 FE ボードにはトリガー信号が送られる。トリガー回路で生成された信号は TCS (Trigger Control System)[59] に送られ、ここで最終的なトリガー信号が生成される。TCS は、CERN-LHC 実験で開発された TTC レーザークレート [60] に基づいて構成されており、トリガー信号はこの TTC レーザークレートから、CATCH (あるいは GeSiCA) を通して各 FE に送られる。TCS はこの他に、TDC で使用される 38.88 MHz のリファレンス・クロックの分配等の様々な役割を担っている。

FE 回路でデジタル化されたデータは、実験エリア内の各検出器の近傍に設置された Readout Driver に送られる。COMPASS の測定系を構成する殆ど全ての検出器には、検出

器固有の FE ボードと TCS、ROB の共通のインターフェースとして使用される Readout Driver として CATCH (COMPASS Accumulate, Transfer and Control Hardware) が使用されている。GEM 検出器とシリコンマイクロストリップ検出器には GeSiCA が使用されているが、以下の議論では CATCH についてのみ述べる。データが CATCH によって受け取られると、各 CATCH モジュールにおいて、まず第 1 次的なイベント構成が行われる。あるイベントに属するデータを組み合わせ、サブイベントデータが形成される。

CATCH で構成したサブイベントデータは、高速の光学リンクを通じて計測室内にある ROB (Readout Buffer) と呼ばれる PC に送られる。各 ROB には 1 ないし数種類の検出器グループに使用される CATCH が接続され、少なくとも 1 スピル分のすべてのデータを一時的に記録しておく。データは次に、ROB から Gigabit Ethernet を通じてフィルター PC (Event Builder) に送られ、最終的なイベント構成 (Event Building) が行われる。ここで、すべての検出器から得られたデータがイベントごとにまとめられ、完全なイベントデータが形成される。また、この時点で簡単な Event Reconstruction も行われ、物理的なカットによってデータは $1/5 \sim 1/10$ 程度にまで減らされる。最終的にこのデータは 30 Mbps のレートで、実験ホールから約 5 km 離れた CERN の Meyrin サイトにある CDR (Central Data Recording) 施設に転送される。ここで、イベントデータは Objectivity/DB に格納される。このデータベースは一時的にディスクに保存されるが、その後、長期間保存用のテープ媒体に保存される。各年の測定で収集されるデータ量は、毎年 300 TB にもなる。

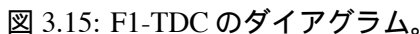
3.4.2 F1-TDC

F1-TDC チップ [61] は、計数率が最大で数 MHz、時間分解能 100 ps 以下の時間測定が要求される SciFi トラッカー、BMS の厳しい条件を満たすことを最大の目標として開発された。パイプラインでのデータの読み出しにより、時間変換中の不感時間のない測定が可能である。

F1-TDC チップは様々なモードにより使用することができ、これを切り替えることで COMPASS の多種多様な検出器に要求される異なる性能に対応できる。基本的な使用モードは 3 種類あり、通常 (Standard) モードの他に、高精度 (High Resolution) モード、ラッチ/ヒット (Latch/Hit) モードが COMPASS で使用されている。

図 3.15 に F1-TDC のブロック図を示す。F1-TDC チップは基本的に 8 チャンネルの構造を持ち、その論理構造は時間計測部、トリガーマッチング、Readout バッファ、出力インターフェースに区分される。

時間計測部の心臓部は、Asynchronous Ring Oscillator である。この発振器は 19 個の電圧制御型のゲート遅延回路で構成されている。個々の遅延回路の遅延時間 (LSB) により、時間測定の分割幅 (ビン)、すなわち時間測定精度が決定する。この遅延時間は電圧のほか



F1-TDC は、通常 (Standard) モードで 8 チャンネルの TDC として使用される。あるチャンネルに信号が入力されると、ゲート遅延回路で得られる精密な時間情報と粗い時間カウンタ (Coarse Counter) の組み合わせによりダイナミックレンジ 16 bits で時間測定が行われ、タイムスタンプがヒットバッファ (Hit Buffer) に記録される。COMPASS の場合、ダイ

ナミックレンジは約 $8.5\ \mu\text{s}$ に相当する。

各入力チャンネルは、最大 1 LSB まで 64 ステップで個々に遅延させることができる。高精度 (High Resolution) モードでは、隣接する 2 つの入力チャンネルが内部で接続され、信号は分割されて 2 つの TDC チャンネルに入力される。このとき、一方のチャンネルを LSB の半分だけ遅延させ、2 回の独立な時間測定を行う。2 個の独立なタイムスタンプから得られる 2 倍の精度のタイムスタンプがヒットバッファに記録される。これにより、時間測定のピンは通常モードの半分になり、COMPASS の場合 $129/2 = 64.5\ \text{ps}$ となる。この場合、時間測定のダイナミックレンジ (16 bits) は約 $4.2\ \mu\text{s}$ と通常モードの半分になる。高精度モードの場合、入力チャンネル数は F1-TDC チップあたり 4 チャンネルとなる。COMPASS では、特に時間分解能の高い BMS で、高精度モードが使用されている。また、SciFi トラッカーの下流側 4 ステーションでも使用されている。

もう一つの使用モードは、ラッチ (Latch) モード、あるいはヒット (Hit) モードと呼ばれている。このモードでは、F1-TDC チップあたりの入力チャンネル数は 32 チャンネルになる。図 3.15 に示したように、F1-TDC の 8 個の入力チャンネルには、それぞれ 4 チャンネルの入力レジスターが装備されている。32 個の入力チャンネルは 4 チャンネルごとにこの入力レジスターに接続される。4 チャンネルの信号はロジック OR を介して TDC の 1 チャンネルに送られ、時間測定が行われる。ヒットバッファには、タイムスタンプの上から 12 bits と、入力レジスターから得られるヒットワイヤーの情報 4 bits とが記録される。すなわち、このモードでは予め設定したストロブ時間内に、この 4 チャンネル中に複数のヒットがあった場合は同時のヒットと見なされる。このとき時間測定精度は発振器の 1 周期にあたる $38 \times \text{LSB}(129\ \text{ps}) \sim 4.9\ \text{ns}$ 程度になる。COMPASS では、それほど高い精度での時間測定が要求されず、かつ極めて多くの読み出しチャンネルを持つ MWPC、PIT にこのモードが使用されている。

各モードにおいて、ヒットバッファに記録されたデータは次にトリガー信号との時間相関によって選別される。この過程をトリガーマッチング (Trigger Matching) と呼ぶ。ヒットバッファは通常モードの場合、1 入力チャンネルあたり 16 ヒットまで蓄積できる。高精度モードの場合、隣接チャンネルのヒットバッファを併用するので、倍の 32 ヒットまで蓄積可能である。したがって、より高い計数率、長いトリガー遅延時間に対応する。また、2 つのヒットバッファに対して並行にトリガーマッチングが行われるので、そのパフォーマンスも向上する。

図 3.16 に、トリガーマッチングの概念図を示す。TCS から CATCH を介して入力されるトリガー信号についても、検出器のヒットと同様に時間測定が行われる。このとき、トリガーのタイムスタンプから予め設定されたトリガー遅延時間が引算され、データはトリガーバッファに記録される。トリガーマッチングの回路は、このトリガーデータとヒットバッファに蓄積されているヒットデータとを比較する。図 3.16 に示したように、遅延時間

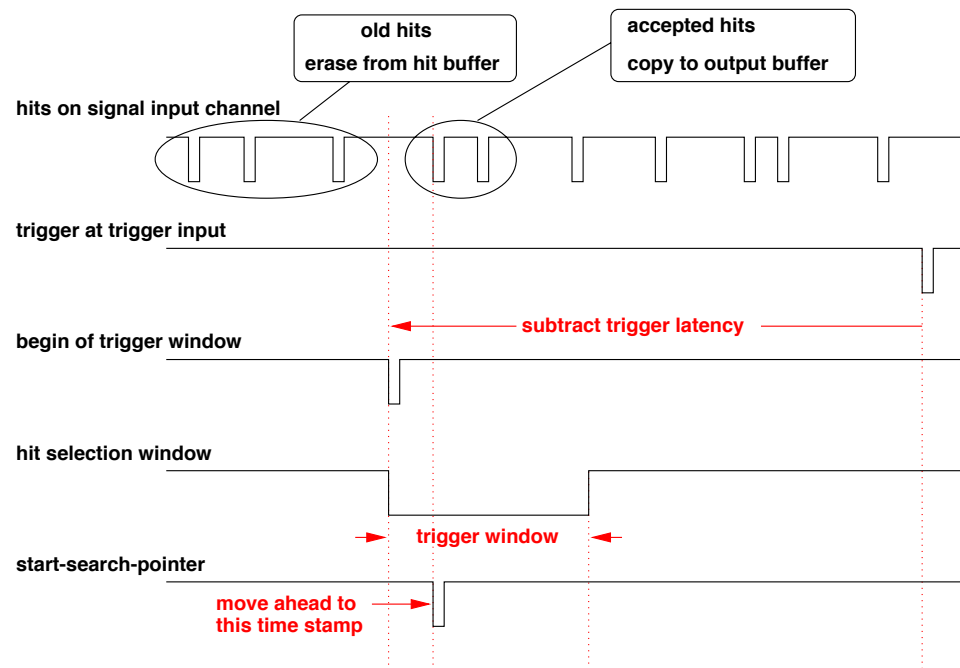


図 3.16: トリガーマッチングの概念図。

を引算したトリガーのタイミングから予めプログラムした幅のタイムウィンドウを開く。まず、これよりも古いヒットは消去され、タイムウィンドウ内に含まれるヒットのデータのみが、Readout バッファにコピーされる。このとき、ヒットデータにはスピル番号、イベント番号等の情報がヘッダに付加される。タイムウィンドウの幅はドリフト時間等、各検出器で予想される信号到達時間のばらつきを考慮して決定され、トリガー遅延時間とともに、TDC の初期化の段階で読み込まれる。

ある程度の時間以上トリガー信号が入力されないと、ヒットバッファがデータで一杯になってしまい、以後のデータが失われてしまうことが考えられる。これを防ぐために、トリガーバッファにデータがなくなった時点で F1-TDC で人工的にトリガー信号が生成される。この人工トリガー信号は本物のトリガー信号と全く同じようにトリガーマッチングの過程に送られ、これにより、ヒットバッファから古いヒットデータが消去される。ただし、この人工トリガーに偶然マッチするヒットがあっても、そのデータは Readout バッファにはコピーされない。

F1-TDC と CATCH との接続の方法には 2 種類のオプションがある。イベントレートが極めて高い SciFi トラッカーやトリガーホドスコープについては、TDC は Mezzanine カードに直接マウントされる。各 Mezzanine カードは 4 個の TDC チップを持ち、通常 (高精度) モードで 32(16) チャンネルの入力に対応する (ソフトウェアで選択される)。読み出し速度は 120 Mbps を許容する。

Micromegas、ドリフトチェンバー、ストローチェンバー等では、F1-TDCは検出器に直結されたFEボード上に搭載され、通常モードで使用される。特に、Micromegasの場合は信号のLeading Edge、Trailing Edgeの両方の時間測定を行い、ノイズを抑制する。MWPC、PITでも同様に、F1-TDCはFEボード上に搭載され、ラッチ/ヒットモードで使用される。FEボードに搭載するF1-TDCは、閾電圧調整を行うためのDACインターフェースを持つ。

3.4.3 CATCH

CATCH (COMPASS Accumulate, Transfer and Control Hardware) はFE回路とTCS、ROBを繋ぐ共通のインターフェースとして、COMPASS測定系においてシリコンマイクロストリップ検出器、GEM検出器を除く全ての検出器に使用されている。

CATCHは9UサイズのVMEモジュールで、1モジュールに4個のMezzanineカードを装着できる。COMPASSではこれまでに、IEEE-CMC規格[62]に準拠して(1)HOTLink-CMC、(2)TDC-CMC、(3)Scaler-CMCの3種類のMezzanineカードを開発している。これらの交換により、簡単に異なったインターフェースが得られる。

HOTLink-CMCは、外部のFEボードのインターフェースとして使用されるもので、4基のHOTLinkのde-serializer/receiverチップ[63]を持つ。4台のFEボードとのHOTLink接続には通常のEthernetで使用される4芯のツイストペアケーブル(UTP-CAT6)が用いられ、最大40Mbpsのデータ転送を行う他、トリガー信号、リファレンスクロック、FE回路の初期化データ等がやりとりされる。このケーブルのほか、光ファイバーケーブルの使用も可能である。**TDC-CMC**は4基のF1-TDCチップを搭載し、通常(高精度)モードで128(64)チャンネルのTDCモジュールとして使用される。COMPASSでは、SciFiトラッカー、BMS、トリガーホドスコープでこのタイプが使用されている。**Scaler-CMC**は32チャンネル、250MHzで不感時間のないスケーラを搭載している。

1台のCATCHモジュールに接続されたFEボードからあるイベントに属する(あるトリガー番号を持つ)すべてのデータが受信されると、これをサブイベントデータとしてまとめ、S-LINKモジュール[64]を介してROBに転送する。各CATCHモジュールは、少なくとも数イベント分のデータを一時的に保存しておくだけのメモリ容量を持つ。

CATCHからのデータ転送はS-LINKを使って行われ、VME-busは通常使用しないが、低いデータレートであればこれを用いてCATCH内のデータにアクセスすることも可能であり、簡単なテストビーム用のDAQにも対応する。また、VME-busはFEボードの初期化、調整のための通信にも使用される。

第4章

COMPASS 実験用シンチレーティングファイバー・トラッカー

前章 3.2.3 節で概説したように、COMPASS の測定系において VSAT (Very Small Area Tracker) と呼ばれる検出器グループは、主にシンチレーティングファイバー (SciFi) トラッカーによって構成される。COMPASS で使用する 2×10^8 muons/spill という大強度ビームの通過領域 (ビームスポット) を完全にカバーし、ビームスポット内およびその近傍での飛跡測定が求められるこの検出器には、実用化されている他の検出器では実現不可能な以下のような極限の性能が要求される。

- (1) 2×10^8 muons/spill の大強度ビームが直径約 4 cm の領域に入射する、最大で約 10^7 particles/cm²·s という極めて高いビームフラックスの下で安定な性能が得られる高計数率耐性。
- (2) 最大で 100 MHz 近いバックグラウンドから、トリガーイベントを 90% 以上の確率で識別するための、400 ps (rms) 以下の高い時間分解能。
- (3) 入射および散乱ミューオンの飛跡の 200 μ m 以下の精度での位置測定。

高位置精度、高計数率型の飛跡測定器は高エネルギー物理学実験の技術開発の中でも最も精力的に研究が行われている分野であるが、これほどの高いビームフラックスに対応し、高い時間分解能を持つ検出器は未だ実用化されていない。

私は、COMPASS においてこの SciFi トラッカーの開発研究および実機の建設を担当した。COMPASS-SciFi トラッカーにおいては、特に上記 (1) の高計数率耐性と、(2) の 400 ps (rms) 以下の時間分解能の実現に重点をおいて開発研究を行った。本章では、まず 4.1 節でシンチレーティングファイバーを用いた様々な検出器の開発の現状を概説する。次に、4.2 節で COMPASS における SciFi トラッカー系の役割と、システム全体の概要を述べる。4.3.1 節以降の節では、COMPASS-SciFi トラッカー系全 8 ステーションのうち私が担当した上流側の 4 ステーションに共通な検出器の構成について、詳しく述べる。

4.1 シンチレーティングファイバー・トラッカー概論

シンチレーティングファイバー (Scintillating Fiber; SciFi) トラッカーは、SciFi(光ファイバー状のシンチレーター) を用いたシンチレーションカウンタ・ホドスコープである。多数の SciFi を並べたファイバー束に荷電粒子が入射すると、粒子の通過したファイバー中でシンチレーション光が生成される。この光パルスを検出することにより、粒子が束の中のどのファイバーを通過したか、すなわち、粒子の通過位置を知ることができる。ホドスコープで一般的に使用されるシンチレーター・ストリップよりも細いファイバーを用いることで、高い位置決定精度が得られる。同時に、ピクセルが細くなることでより高い入射粒子のフラックスに対応できるという利点がある。

SciFi トラッカーの実用化においては、光検出デバイスの性能が重要な鍵となる。適切な光検出デバイスを選択することによって、実験によって課せられる多種多様な要求を満たす検出器を実現することが可能である。

光検出デバイスとしては位置感応型光電子増倍管 (Position-Sensitive Photomultiplier tube; PSPM) が最も一般的であり、PSPM を用いた SciFi トラッカーは様々なアプローチにより実用化されている [31, 32, 33, 34, 65, 66, 67, 68]。PSPM の他にも、Image Intensifier (II)、Visible Light Photon Counter (VLPC)、Avalanche Photodiode (APD) 等が、SciFi ホドスコープの光検出デバイスとして実用化され、あるいは実用化に向けた開発研究が行われている。Image Intensifier は CCD との組み合わせにより大量のファイバーチャンネルの読み出しを安価に行うことができる利点がある。したがって非常に大型の検出器の建設を容易にし、CERN の CHORUS 実験等で実用化されている [69, 70, 71]。VLPC は量子効率が 80% 程度と高く、ゲインも 20000 以上と比較的大きいため、例えば一本の細いファイバーから得られる微量の光信号を高い検出効率で検出することが可能である [72]。しかし動作温度が 7 K と非常に低温を要し、液体ヘリウムを使用する大規模な設備を必要とする。この代案として近年 APD 読み出しの SciFi トラッカーの実用化が研究されている [73, 74]。APD は量子効率が 70% を上回るが、ゲインが低いことが難点であった。しかしこれを -40°C 程度に冷却することで、S/N 比が向上することがわかってきた。この程度の低温であれば VLPC のような大規模な冷却設備を必要としないため、安価でコンパクトな装置の実現が可能である。

様々な光検出デバイスの中で、光電子増倍管 (PMT) は高いゲインと低いノイズレベルに加え、取扱いの簡便さ、信頼性の高さなどの優れた特徴を持つが、SciFi トラッカーでの使用を考えたときに最大の利点となるのはその高速応答性と高計数率耐性である。この二つの利点によって、信号生成 (シンチレーション発光) 過程の時間スケールが極めて短い ($\sim\text{ns}$) という非常によく知られたシンチレーターの優位性を、PMT 読み出しによって最大限に生かすことができる。ただし、SciFi トラッカーは通常かなり多くのチャンネル

数を持つので、通常の PMT を使用するのには費用的にも、空間的にも経済的でない。SciFi トラッカーにおいては、多数のチャンネルを持つマルチアノード型の PSPM が非常に有利である。

PSPM 読み出しの SciFi トラッカーは、1990 年代に入りヨーロッパ原子核研究機構 (CERN) の RD-17 (FAROS) コラボレーション [33] を中心に精力的に開発研究が進められ、1995 年頃からその高い性能が示されてきた。RD-17 での一連の研究によって、SciFi と PSPM との組み合わせで高い位置分解能と時間分解能を同時に満たす理想的な飛跡位置測定器を実現し得ることが示され、この種の飛跡位置測定器の高エネルギー物理学実験における実用化への道が開かれた。同時にこの研究は、PSPM 読み出しの SciFi トラッカーで得られる飛跡位置情報をトリガーの早い段階でのイベント選択に利用する、いわゆる *topological trigger*[34] への応用に、大きな成果をあげた。

しかしながら、初期の PSPM は高いクロストーク、チャンネル間のゲインのばらつきの大きさ等が大きな問題であり、これらを改善することは非常に困難であった。この状況を一変させたのが、1995 年頃に浜松ホトニクスによって開発商品化されたメタルチャンネルダイノード型 PSPM、R5900 シリーズである。この型の PSPM はこれまでの問題を解決し、さらに、非常にコンパクトなデザインを実現した。こうした近年の、特にこの 10 年ほどの間に達成されたシンチレーティングファイバーおよび光電子増倍管の技術の目覚ましい進歩によって、SciFi トラッカーの性能は著しく向上した。同時に、新しい高エネルギー物理学実験がより高いルミノシティを必要とするようになり、高計数率環境での高位置分解能、高時間分解能の飛跡測定器の必要性が増したことにより、PSPM 読み出しの SciFi トラッカーの開発研究がさかんに行われるようになった。CERN の DIRAC (PS212) 実験では 10^7 particles/s 程度の高計数率環境において、飛跡位置測定および *topological trigger* デバイスとして、SciFi トラッカーの実用化を果たした [75]。

COMPASS では、過去に例のない 10^8 particles/s の高いビーム計数率での飛跡位置測定が要求されている。この条件では高い計数率耐性と同時に、1 ns 以上の高い時間分解能が必要となる。このような厳しい要求を満足する唯一の選択肢として、PSPM 読み出しの SciFi トラッカーを選択し、その実現に向けて開発が行われることとなった。

4.2 COMPASS 実験における SciFi トラッカー系の概要

COMPASS 実験の SciFi トラッカー系はグルーオン偏極度測定において本質的に重要な役割を担っている。本節では第 2 章で議論したグルーオン偏極度測定実験からの要請を明確にした上で、COMPASS 実験装置における SciFi トラッカー系全体の概要を述べる。特に、COMPASS-SciFi トラッカー全 8 ステーションのうち、私が担当した上流側 4 ステーションについて詳しく解説する。

4.2.1 核子内グルーオン偏極度測定における SciFi トラッカーの役割 ～ グルーオン偏極度測定に与えるインパクト ～

COMPASS で測定する個々のイベントについて、深非弾性散乱の解析に必要な運動学変数である、仮想光子へのエネルギー移行の割合 $y = \nu/E$ (E : 入射ミュオンエネルギー、 ν : 仮想光子エネルギー)、4 元運動量移行 Q^2 は反応前後のミュオンの運動量、散乱角度を決定することによってのみ決定することができる。このため標的の前後において、入射および散乱ミュオンの飛跡を精度よく決定することが求められる。同時に、この飛跡測定によりバーテックスを決定し、捕らえたイベントが確かに標的中で生じた深非弾性散乱イベントであることを確認してバックグラウンド事象と明確に区別することは、断面積の小さな過程に基づいた精密実験においては本質的に重要な意味を持つ。

COMPASS のグルーオン偏極度測定では、この散乱ミュオンを捕らえる測定系に、ビームスポットまでをカバーし、ミュオンの散乱角度については $\theta = 0$ を含め、50 mrad 程度までの前方に散乱されるミュオンの完全な捕捉を要求する。この要求により、COMPASS では SciFi トラッカー系 (VSAT) を使用し、他の検出器では計測不能な大強度ビームのビームスポットとその近傍での飛跡測定を行う。この、ビームスポットおよび近傍の散乱ミュオンを捕らえることは、グルーオン偏極度測定において本質的に重要である。

(2.10) 式に示したように、減偏極係数 D は $D \approx \{1 - (1 - y^2)\} / \{1 + (1 - y^2)\}$ で与えられるので、深非弾性散乱において十分な光子の偏極度を与えるためにはある程度大きな y が必要である。COMPASS では $y > 0.3$ でカットをかける。

ミュオンと核子の深非弾性散乱で、光子-グルーオン融合 (PGF) 過程によるオープンチャーム生成の断面積は、quasi-real photon イベント (4 元運動量移行 $Q^2 \approx 0$ 、ミュオンの散乱角度 $\theta \approx 0$) による反応が支配的である ((2.6) 式、(2.7) 式参照)。極小の Q^2 は散乱角度が 0 のときに与えられ、 $Q_{min}^2 = \frac{m^2 \nu^2}{E(E-\nu)}$ である。実験的には、 $Q^2 > Q_{min}^2$ の関数で与えられる断面積を十分にカバーするために、散乱ミュオンの角度アクセプタンスは 5 mrad 程度まで広げる必要がある。これは $E = 100(200)$ GeV、 $\nu = 30(60)$ GeV の場合、quasi-real 断面積の実に 90% に相当する。

また、実験で得られる正味の断面積は、 ν の関数としては $1/\nu$ のように ν の減少に伴って増加する (表 2.1 第 7 コラム参照)。したがって、 $y > 0.3$ の範囲において、小さな y で多くのイベントが発生する。 y の小さいイベントでは、散乱ミュオンのエネルギー損失が小さく運動量が高いため、スペクトロメーター電磁石による偏向が小さいことは明白である。最前方に放出され、エネルギー損失の小さい散乱ミュオンは、COMPASS スペクトロメーターの 2 段の偏向電磁石によって曲げられても、相当下流に達するまでビームスポット (ビーム粒子の通過する領域) から完全に分離しない。したがって、ビーム粒子の中に紛れるこのような散乱ミュオンの飛跡を精度よく測定するためには、スペクトロメー

ターの上流から下流まで、ビームスポット自体をカバーする検出器が不可欠である。

このように、ビームスポットをカバーして散乱ミューオンの飛跡測定を行うことは、グルーオン偏極度測定において本質的に重要である。COMPASS のグルーオン偏極度測定において不可欠な 10^8 particles/s の大強度ビームの使用と、ビームスポット内での飛跡測定を同時に実現するためには、高い計数率耐性を持つ飛跡測定器の存在が不可欠である。ビームのフラックスは平均で約 10^7 particles/cm²·s にもなり、このような条件で使用された飛跡位置測定器の例はこれまでにない。特に、 10^8 particles/s の大強度ビームのビーム粒子の飛跡による高いバックグラウンドからトリガー事象に起因する散乱ミューオンの飛跡を特定し、かつ比較的高い精度で飛跡位置を測定するという厳しい条件を満たす検出器としては、PSPM 読み出しの SciFi トラッカーが唯一の選択肢である。

SciFi トラッカーの使用により最前方に散乱された極小の Q^2 、比較的小さな y の領域までを完全にカバーできることは、特にグルーオン偏極度測定において本質的な、COMPASS スペクトロメーターの大きなアドバンテージである。

4.2.2 COMPASS-SciFi トラッカー系

ここで、COMPASS ミューオンプログラムで使用される SciFi トラッカー系全体の概要を述べる。COMPASS ミューオンプログラムでは、偏極核子標的の上流に 2 台、標的下流のスペクトロメーター中に 6 台、計 8 台の SciFi ステーションを設置し、使用する。表 4.1 に、全 8 台の SciFi トラッカー・ステーションの Z 座標 (標的中心からの距離) および基本仕様を示した。また、図 4.1 に、COMPASS スペクトロメーター中での SciFi トラッカー全ステーションの位置関係を見ることができる。

表 4.1: COMPASS ミューオンプログラムにおける各 SciFi ステーションの仕様

Station	Station position in z (m)	Fiber diameter (mm)	Column pitch (mm)	Fibers per column	Active area (mm ²)	Total # of channels in XY-planes	# of chan. in inclined plane
SF1	-7.0	0.50	0.41	7	39.4×39.4	192	-
SF2	-3.0	0.50	0.41	7	39.4×39.4	192	-
SF3	1.0	0.50	0.41	7	52.5×52.5	256	128
SF4	2.2	0.50	0.41	7	52.5×52.5	256	128
SF5	5.5	0.75	0.55	5	84×84	320	-
SF6	13.0	1.00	0.70	4	100×100	286	176
SF7	20.0	1.00	0.70	4	100×100	286	-
SF8	31.0	1.00	0.70	4	123×123	352	-

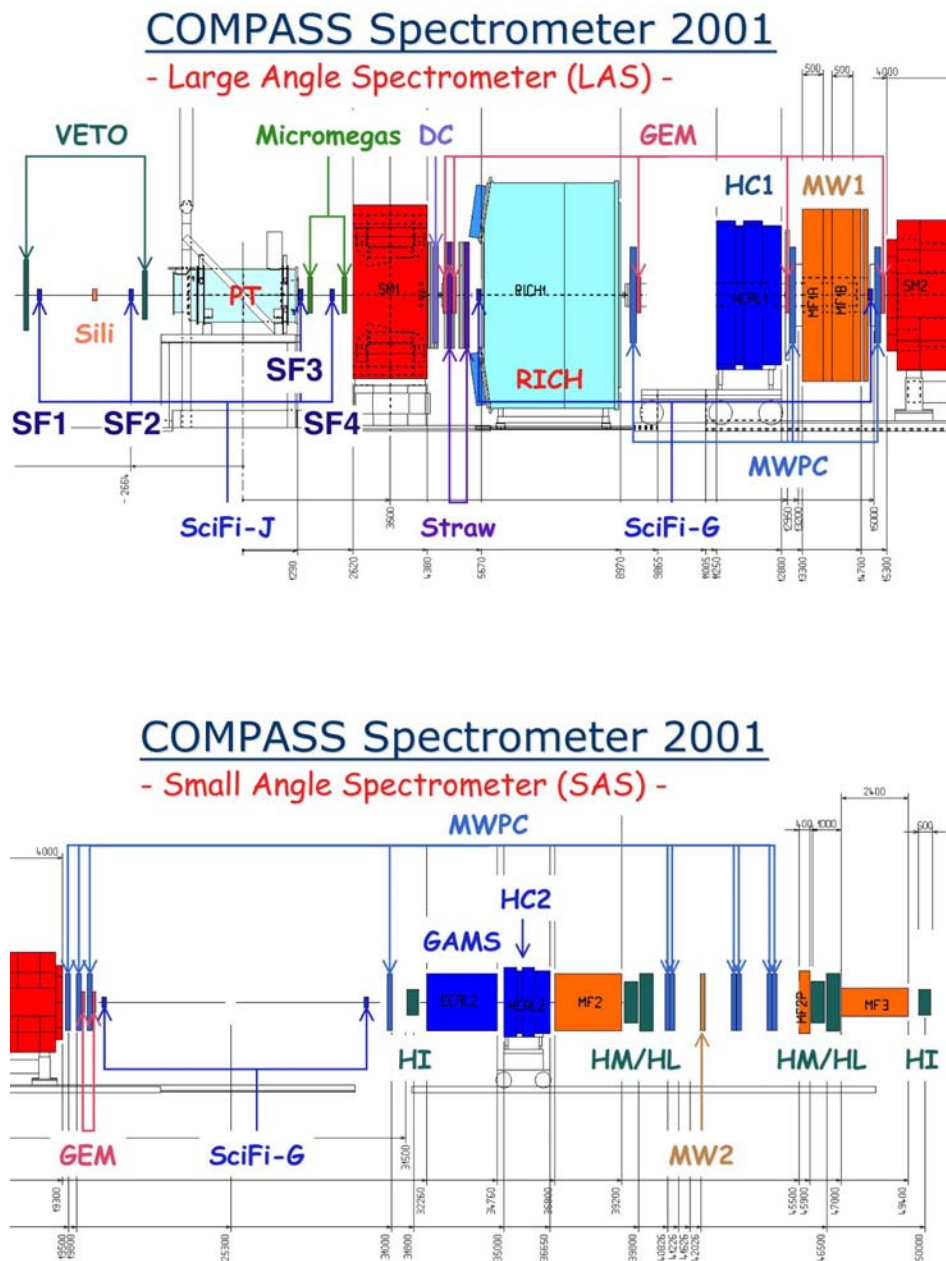


図 4.1: COMPASS スペクトロメーターの 2001 年のセットアップ図。上段の実験装置の下流 (右側) に下段の装置が続けて配置されている。

COMPASS スペクトロメーターは、偏極標的用超伝導ソレノイド電磁石と2台のスペクトロメーター電磁石によって、大別すると4つのセクションに分けられる。それぞれ(1)標的上流、(2)標的-SM1間、(3)SM1-SM2間、(4)SM2下流である。8台のステーションは各セクションに2台ずつ設置され、セクション内で飛跡の座標が2点で決定される。すなわち、各セクションで飛跡の直線を決定する必要十分なセットアップが、8台で構成される。各ステーションはX、Yの直交する2プレーン、または、これに加えて45度傾けられたU(V)プレーンを加えた3プレーンによって構成され、1ステーションで2ないし3方向の飛跡位置測定が可能である。

COMPASS-SciFiステーションは、その役割において大きく二つのグループに分けられる。すなわち、ビームホドスコープ・ステーション(SF1、SF2)とスペクトロメーター中に置かれて散乱ミュオンの飛跡位置測定に使用されるスペクトロメーター・ステーション(SF3-SF8)である。

COMPASSの実験装置において、SciFiトラッカーの主な役割は、他の測定器でカバーできないビームスポットでのミュオンの飛跡位置測定である。ビームは標的近傍でフォーカスするように調整され、スペクトロメーターの下流に行くにしたがってスポットサイズが大きくなるため、下流のステーションは標的付近のステーションに比較して大きな有感領域が要求される。一方で、ビームのフラックス(単位面積あたりの入射粒子数)は下流ほど小さくなるため、SF1からSF4までは直径0.5 mmのファイバーが使用されるのに対し、下流のステーションでは読み出しチャンネル数を減らして効率化するために、SF5で0.75 mm、SF6からSF8では直径1 mmのファイバーが使用される。

スペクトロメーター・ステーションでは、多重散乱を抑えて2次生成粒子の運動量の測定精度を高めるために、PSPMのような大きな物質量はスペクトロメーターの受容領域外に逃がすことが不可欠である。このため、各ステーションで、約1.5 m程度のクリアファイバー・ライトガイドが必要となる。特に、標的直後、SM1との間に置かれるSF3とSF4は、図4.2に示したような偏極標的用超伝導ソレノイド電磁石の形成する強い漏れ磁場の中で使用されるので、磁場の影響によるPSPMの出力の低下を避けるために、さらに長い2～3 mのライトガイドを使用し、PSPMを十分に磁場の低い領域まで逃がす必要がある。SF4の設置される位置では、SM1の漏れ磁場も同様に強く、この影響も考慮しなければならない。後に5.5節で示すように400 G¹までの磁場磁場であれば簡単な鉄製の磁気シールドでその影響を防げることが明らかになったので、400 Gを目安に、SF3で3 m、SF4で2 mのライトガイドを使用することにした。以上の特徴により、SF3とSF4を特にターゲット・ステーションと呼ぶ。なお、図4.2はCOMPASSの最終セットアップで使用されるCOMPASS電磁石のもので、2002年までの実験では開口角の小さなSMC電磁石が使用された。SMC電磁石の漏れ磁場は、この図に示した値の10%以下と非常に小さい。

¹Gauss. 400 G = 40 mT

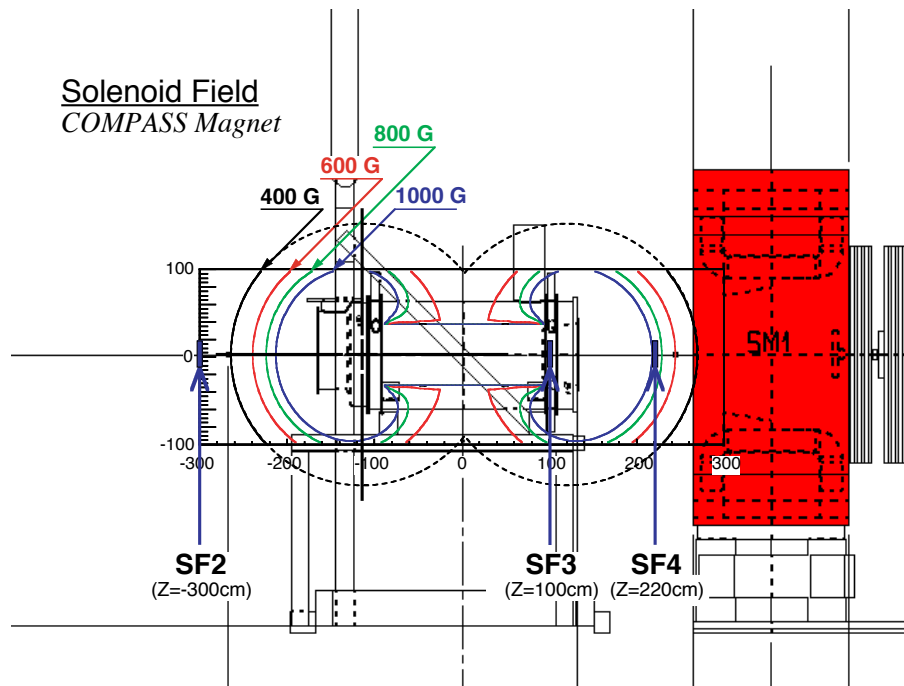


図 4.2: COMPASS 偏極標的用ソレノイド電磁石の漏れ磁場。

COMPASS では、日本・ロシアの共同研究チームとドイツの研究チームの独立な 2 グループで、上下流 4 ステーションずつを分担して開発研究および実機の建設を行った。我々日本グループは、ロシアの IHEP (Protvino) グループと共同で SF1 から SF4 までの標的前後に置かれる 4 台の SciFi ステーションの建設を担当した。ビームホドスコープ・ステーションとターゲット・ステーションは、ビームのフォーカスする標的に比較的近い距離に設置されるため、ともに 0.5 mm 直径のファイバーを使用する等、基本的な仕様がほぼ共通している。

以下に、ビームホドスコープ・ステーションとターゲット・ステーションについて、それぞれの役割と要求される性能を詳しく述べる。

ビームホドスコープ・ステーション

ビームホドスコープ・ステーション (SF1、SF2) は入射ミュオン (ビーム粒子) の再構成に使用される。ビーム粒子の再構成には、ビーム粒子の運動量と飛跡の決定が必要である。前の章ですでに述べたように、ビームの運動量は BMS を用いて測定し、ビームホドスコープは標的直前での飛跡を測定する。ビームホドスコープと、標的の 100 m 上流に位置する BMS との間には一連の電磁石が配置され、実験に必要なビームの成形をする。この間でビームを空間情報をもとに追跡 (トラッキング) する手段はなく、BMS の測定値と

SciFi で決定する飛跡との関係付けには時間情報のみが頼りとなる。したがって、ビームホドスコープ・ステーションでは特に高い時間分解能を持つことが重要になる。

SF1 および SF2 は、各 X、Y の直交する 2 プレーンより成る。SF1、SF2 の設置される位置 ($Z \sim -7\text{ m}, -3\text{ m}$) におけるビームサイズは標準偏差 (rms) で直径 8 mm から 10 mm 程度である。ビームのフラックスは平均で約 $10^7\text{ particles/cm}^2\cdot\text{s}$ 程度が予想される。また、0.5 mm ファイバーを使用した場合に予想される計数率は、平均で 1 MHz/channel、最大値で 2 MHz/channel のオーダーである。有感領域の大きさとしては、標的直径 3 cm より十分大きく、ビームの $\pm 2\sigma$ をカバーするために $4 \times 4\text{ cm}^2$ が要求された。位置分解能は $200\text{ }\mu\text{m}$ (rms) 程度を仮定すると、2 ステーションで決定するビームの入射角度分解能が 0.1 mrad 以下になる。これは、ビームの通過する偏極標的システムの物質質量 (放射長の約 1 倍) での多重散乱の角度と大体一致する。ホドスコープのピクセルのピッチが 0.4 mm であれば理想的な位置分解能は $120\text{ }\mu\text{m}$ 程度になる。

時間分解能は、上述した計数率の予想値 1 MHz/channel より、平均して 10 ns に 1 個の割合で入射するビーム粒子の飛跡からトリガー事象に関与した粒子の飛跡を選び出すときの偶然同時計数の確率を 10% 以下に抑えるために、FWHM で 1 ns 以下を目標とした。これは標準偏差 (rms) では約 400 ps に相当する。

ターゲット・ステーション

ターゲット・ステーション (SF3、SF4) は、より下流に位置する他のスペクトロメーター・ステーションと同様に COMPASS の飛跡測定器系において VSAT (Very Small Area Tracker) として機能する。標的直後 ($Z < 2.2\text{ m}$) に置かれる SF3 と SF4 では、ビームの空間密度が高いためにビームホドスコープと同様に直径 0.5 mm のファイバーが使用される。標的直後では深非弾性散乱イベントにおいて 2 次生成粒子による高いヒットマルチプリシティが予想されるため、ステレオアンビギュイティを排除する目的で、ターゲット・ステーションでは X、Y プレーンに 45 度傾けた U プレーンを加えた 3 プレーンで各ステーションを構成した。各プレーンの有感領域は $5 \times 5\text{ cm}^2$ よりわずかに大きい。これは、SM1 上流の SAT として SF3、SF4 の周辺領域をカバーする Micromegas チェンバーの不感領域 (ビームキラー) が直径 5 cm の円形であり、この領域を完全にカバーすることが要求されたためである。また、すでに述べたように偏極標的用ソレノイド電磁石の漏れ磁場から PSPM を遠ざけるために、SF3 で 3 m、SF4 で 2 m の長いライトガイドを使用する。

前述したように、VSAT であるスペクトロメーター・ステーションは主に散乱ミューオンの飛跡測定において重要な役割を果たす。グルーオン偏極度測定において特に興味のある quasi-real photon イベント ($Q^2 \approx 0$) は、ミューオンの散乱角度で言えば $0 \sim 5\text{ mrad}$ に分布する。ターゲット・ステーションは第 1 スペクトロメーター電磁石 (SM1) の上流に位

表 4.2: COMPASS-SciFi トラッカーの上流 4 ステーション (SF1-SF4) に要求される性能。

Parameter	Value/Description
Sensitive area	4 cm × 4 cm (SF1, SF2) / 5 cm × 5 cm (SF3, SF4)
Beam flux	~ 10 MHz/cm ² ·s (max.)
Counting rate per channel	1 MHz/channel (typ.) / 2 MHz/channel (max.)
Time resolution	< 1ns (FWHM) / < 400 ps (rms)
Spatial resolution	< 200 μm (rms)
Light guide length	50 cm (SF1, SF2) / 300 cm (SF3) / 200 cm (SF4)

置するため、散乱角度の小さな散乱ミューオンはエネルギー損失 ν によらず全てこれらのステーションを通過する。SciFi トラッカーは有感領域が小さいとは言え、特に SF3 は標的の近傍に設置されるためその角度アクセプタンスは約 ± 25 mrad になる。実際のところ、これは全トリガーシステムのカバーする散乱ミューオンの角度アクセプタンスの約半分であり、quasi-real photon イベントだけでなく、トリガーされる散乱ミューオンの大部分が SF3 を通過することになる。

ターゲット・ステーションでは、偏極標的用超伝導ソレノイド電磁石と SM1 との距離が近いために 2 ステーションの間隔が短く、同じ位置分解能でも飛跡の角度分解能は低くなる。しかしながら、SM1 の下流には数多くの飛跡測定器が配置されており、ミューオンの散乱角度はこれらによってより高い精度で決定することができる。SF3、SF4 においてより重要なのは、ビーム軸方向 (Z) に直交する XY 平面でのバーテックスをある程度精度よく決定することであり、標的中の多重散乱を考慮すると、直径 0.5 mm のファイバーによって得られる位置分解能でこの目的には十分である。時間分解能はビームホドスコープ・ステーションと同様に、400 ps (rms) を目標とする。

まとめ

COMPASS 実験用 SciFi トラッカー・ステーションのうち、ビームホドスコープ・ステーションおよびターゲット・ステーションの 4 台に要求される性能を表 4.2 にまとめた。

付け加えると、SF5 より下流のスペクトロメーター・ステーションはスペクトロメーター電磁石の下流に位置するため、散乱角度が小さく、かつ ν の小さなイベントでの散乱ミューオンの飛跡測定を行うことになる。実際、 ν の小さな領域をカバーする IT トリガークラスの第 1 ホドスコープ (HI04) の受容領域がビーム中心からわずかに 5 cm 程度の距離に位置していることからわかるように、興味のある多くのイベントにおいて、散乱ミューオンはスペクトロメーターのかなり下流までビーム領域から分離しない。したがって、この HI04 ホドスコープの直前に置かれる SF8 のみ有感領域の中心がビーム中心と異

なっているが、他の各ステーションはビームスポットを完全にカバーしている。これらのスペクトロメーター・ステーションにおいても、要求される計数率および時間分解能は、上流側4ステーションとほぼ同じになる。

本節で述べたように、COMPASS の SciFi トラッカー系を構成する8ステーションは、基本的に同じ検出器ではあるが、各ステーションごとに特徴的な性格を持っている。特に、上下流の各4ステーションではファイバー径が異なっており、それぞれに最適化した検出器のデザイン、製作方法によって独立に開発研究が進められた。このため、これらの2グループは互いにかなり異なった特徴を持つ。本論文の以下の節では、我々日本・ロシアの共同チームで担当した上流側4ステーション、すなわち、ビームホドスコープおよびターゲット・ステーションのみに集中し、議論を進めていく。

4.3 検出器の構造 ~ ファイバー・バンドル ~

本節と以下の節で、私が担当したビームホドスコープ・ステーション (SF1、SF2) およびターゲットステーション (SF3、SF4) の基本的な構造と、検出器を構成する各コンポーネントについて詳しく解説する。前節に述べたように、この4ステーションは基本的な構造においてほぼ共通であり、クリアファイバー・ライトガイドの長ささとチャンネル数が異なるのみである。また、次の章で記述する開発研究段階の試作機にも共通する部分が多い。

図4.3に、各 SciFi トラッカー・ステーションの基本単位である"プレーン"の構成を示す。SciFi トラッカーはこのプレーンごとに独立な検出器であり、単一プレーンで粒子の飛跡位置の1次元の情報が得られる。1台の SciFi トラッカー・ステーションは互いに直交するX、Yの2プレーン、または、さらに45°に傾けたUプレーンを加えた3プレーンにより2方向、または3方向の飛跡位置測定を行う。

単一プレーンは、多数のシンチレーティングファイバー (SciFi) で構成した粒子検出部の SciFi アレイと、クリアファイバー・ライトガイド、光検出デバイスである位置感応型光電子増倍管 (PSPM) によって図4.3のように構成される。ここでは、まず4.3.1節において SciFi 検出器本体を成す SciFi アレイとクリアファイバー・ライトガイド部分の構造を詳しく説明する。この部分を総称してファイバー・バンドルと呼んでいる。続いて4.3.2節でファイバー・バンドルに用いるシンチレーティングファイバーおよびクリアファイバーの仕様を記述する。さらに、4.3.3節でファイバー・バンドルの実際の製作工程について詳しく述べる。

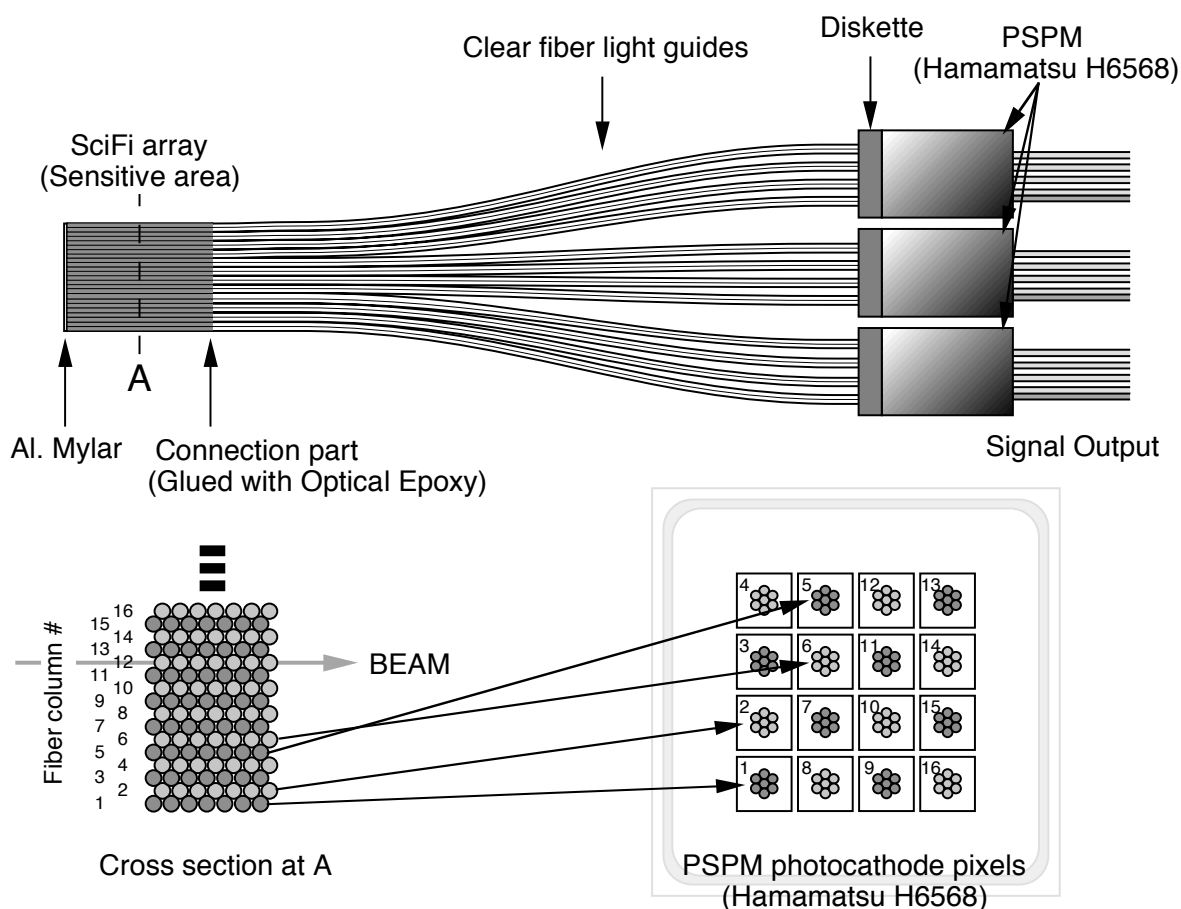


図 4.3: SciFi トラッカー・プレーンの基本構成。単一のプレーンは粒子検出部の SciFi アレイ (SciFi Array) とクリアファイバー (Clear Fiber) ライトガイド、PSPM によって構成される。左下の図に SciFi アレイの断面図と粒子の入射方向を示す。各ピクセルは 7 本のファイバーから成るファイバー・コラム (Fiber Column) で定義される。コラム中の各ファイバーは Connection Part で一本一本クリアファイバー・ライトガイドに接続される。クリアファイバーは図の右側の端でコラムごとにまとめられ、Diskette を用いて右下の図のように PSPM 光電面上の対応する各ピクセルに接続され、独立に読み出される。

4.3.1 ファイバー・バンドルの構造

SciFi アレイ (粒子検出部)

図 4.4 に粒子検出部である SciFi アレイの断面図を示す。SciFi アレイは、7 本の直径 0.5 mm のシンチレーティングファイバーを、ビーム入射方向に一直線に並ぶように積み重ねた 7 層 (レイヤー) 構造になっている。COMPASS-SciFi トラッカーでは、クラレのマルチクラッド型シンチレーティングファイバー、SCSF-78MJ を使用している。このファ

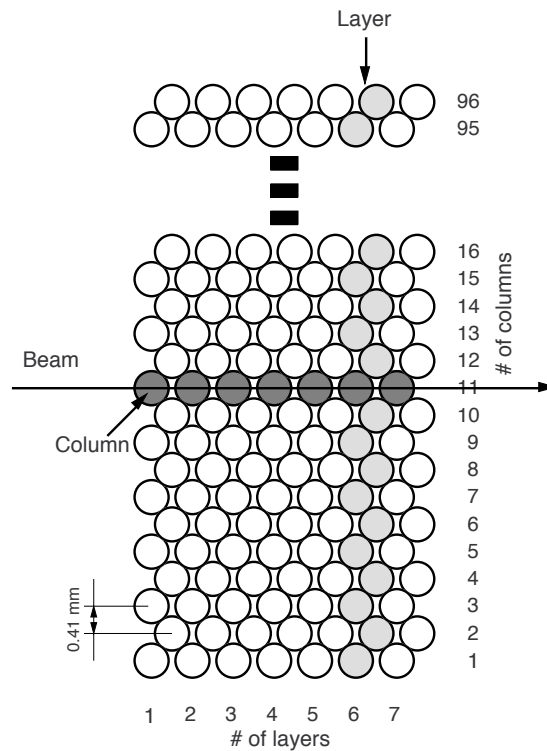


図 4.4: 粒子検出部 SciFi アレイの構造。

イバーの仕様は 4.3.2 節に記述する。

高エネルギーのミュオン等の最小電離粒子が通過したときに 0.5 mm 径等の細いシンチレーティングファイバー 1 本から得られる光子数は非常に少ないので、多くの SciFi トラッカーでこのように粒子の入射方向に複数本のファイバーを重ね、粒子が SciFi アレイを貫通したときに各ファイバーから得られる光パルスの和をとって検出する手法が用いられる。SciFi トラッカーのように光電子増倍管で得られる光電子数が比較的少ない場合、検出器の時間分解能は光電子数に大きく依存する。したがって、高時間分解能の SciFi トラッカーを製作するためにはレイヤー数は重要なパラメータである。一方で、COMPASS においてはビームが直接 SciFi アレイを通過するので、2 次生成粒子による下流の測定系のバックグラウンドを抑制するためには SciFi アレイの物質量を極力小さくする必要がある。次章で詳しく述べる SciFi トラッカー試作機を用いたビームテストでの性能評価の結果を受けて、COMPASS ではこの二つのパラメータを考慮した最適な値として、0.5 mm ファイバーについては 7 レイヤーを採用した。

図 4.4 に示したように、個々のピクセルは、ビームの入射方向に一列に並んだ 7 本のファイバーのグループで構成される。これをファイバー・コラムと呼んでいる。SciFi アレイで生成された光信号は、コラムごとに対応する PSPM チャンネルにより独立に検出される。

隣接コラム間のピッチは0.41 mmとした。したがって、隣接する2コラムに含まれるファイバーの発光部分(コア)はビーム入射方向から見ると重なりあっており、幾何学的な不感領域はない。0.5 mm 径の SCSF-78MJ ファイバーのコアの直径は0.44 mm であり、0.41 mm ピッチの場合重なり部分は0.03 mm となる。SciFi アレイは半層(半レイヤー)単位で製作され、これを2枚合わせてレイヤーを形成した段階でファイバーの位置(ピッチ)がほぼ決定される。レイヤーの製作、積み上げ時には、白ペイントを用いてファイバー同士を接着した。白ペイントにより、隣接コラム間での光の洩れ込みが抑えられる。

SciFi アレイを構成する各ファイバーは有感領域の大きさより5 mm 程度長め(約5 ~ 6 cm)にカットされ、片側の端で一本一本同じ直径のクリアファイバー・ライトガイドに接着される。接着にはオプティカル・エポキシを用いている。これまでの経験から、接着部分での光の損失は10%以下であることがわかっている。

SciFi アレイのクリアファイバーと接続しない側の端面には、アレイ中で生成された光子の収集効率を上げるために、反射材としてアルミ蒸着マイラーを接着した。

なお、次章に述べる開発研究の段階で製作した試作機ではファイバーを最密詰めに積み上げており、この場合はピッチが0.433 mm になる。マルチクラッド型ファイバーを使用した場合、この最密詰めだとコラム間の重なり部分が小さくなり(0.01 mm 以下)、粒子の入射位置によって通過するコアの厚みが極端に少なく検出効率の低いところが出てしまう。そこで、COMPASS 実験用 SciFi トラッカーの実機では SciFi アレイ全面で一様な検出効率を得るために、最終的に0.41 mm ピッチを採用した。最適なコラム間ピッチを決定するために行った計算について、後の6.1.1 節に詳しく述べる。

クリアファイバー・ライトガイド

クリアファイバーは、クラレのマルチクラッド型ファイバー、Clear-PSM の直径0.5 mm を使用している。このファイバーの仕様も4.3.2 節に記述する。SciFi アレイを構成する各ファイバーに接着されたクリアファイバーは、他方の端で1コラム分ごとにまとめられ、黒いプラスチック製²のディスクット(Diskette)に等間隔で空けられた穴の中に接着されている。ディスクットの穴はPSPM 上に区切られたピクセル間のピッチと正確に同じ間隔で空けられており、各コラムのファイバー端が光電面上の各ピクセルの中心に配置されるよう保証する(図4.3 参照)。また、このディスクットを用いて、ファイバー端は光電面ウィンドウにしっかりと押し付けられる。この間の接続にはオプティカル・グリース等は使用していない。

SF1、SF2 では、クリアファイバー・ライトガイドの長さは50 cm である。SF3 および SF4 については、周辺の強い漏れ磁場によるPSPM への影響を避けるために、それぞれ

²Plexy Glass, Röhm GmbH.

3 m、2 m のライトガイドを使用して PSPM を磁場から遠ざけている。当初、この長いライトガイドとして、上述した 0.5 mm 径のクリアファイバーと PSPM の間に直径 2 mm のクリアファイバーを使用した独立な延長ライトガイド・バンドルを挿入する方式が考案され、試作機によるテストで満足のいく結果を得た(次章参照)。この方式はファイバー・バンドルの製作を容易にし、また、長期間の使用により SciFi アレイに発光量の低下等の問題が生じた場合にアレイ部分のみを簡単に交換できる、といったメリットがある。テストで得られた結果はこの方法で十分な性能が得られることを示したが、最終的に実機的设计を行う時点で、以下の問題点が浮上した。

すなわち、ファイバー・バンドルと延長ライトガイド・バンドルとの接続部には何らかのコネクタが必要であるが、信頼性の高い接続を行うためには、このコネクタにはある程度の物質質量がどうしても必要になる。SF4 においてはこのコネクタをスペクトロメーターのアクセプタンスの外に逃がす必要があり、この場合最終的にライトガイドに必要な約 2 m の長さに対し、結局ファイバー・バンドル部分の細いライトガイドに 1 m 以上の長さが要求され、接続によるメリットが少ない。また SF3 についても、偏極標的用電磁石と SF3 直後に置かれる Micromegas ステーションとの隙間が殆どなく、また周辺に偏極標的システムの様々な装置があってスペースが限られているといった設置の条件から、同じように細いライトガイドにかなりの長さが必要になる。ライトガイドのコネクタの信頼性の高い固定方法を考えると、かえって全体のデザインが複雑になってしまうことがわかった。

そこで、我々は最終的に SF3、SF4 のそれぞれについて、長さ 3 m、2 m の 0.5 mm 径クリアファイバー・ライトガイドを持つファイバー・バンドルのデザインを採用した。これによるバンドル製作の工程上の困難に対しては、製作テクニックを改良して克服した。

4.3.2 シンチレーティングファイバーとクリアファイバー

シンチレーティングファイバーおよびクリアファイバーは、共にクラレのマルチクラッド型プラスチック・ファイバーの直径 0.5 mm を使用した [76]。図 4.5 と表 4.3 に、このファイバーの構造を示す断面図とクラレのプラスチックファイバーのコアおよびクラッドの材質を載せた。この開発研究において我々が使用し、本論文に登場する全てのシンチレーティングファイバーとクリアファイバーにおいて、その構造とコアおよびクラッドの材質は全く共通である。

光ファイバーは、材質の異なるコアとクラッドにより、屈折率の小さいクラッドとの境界面で生じる全反射を利用して、光を伝達する。図 4.6 に、シングルクラッド型とおよびマルチクラッド型ファイバーの全反射の角度アクセプタンスを比較した。このように、マルチクラッド型ファイバーはクラッドの二重構造により全反射の角度アクセプタンス、す

4.3. 検出器の構造 ~ ファイバー・バンドル ~

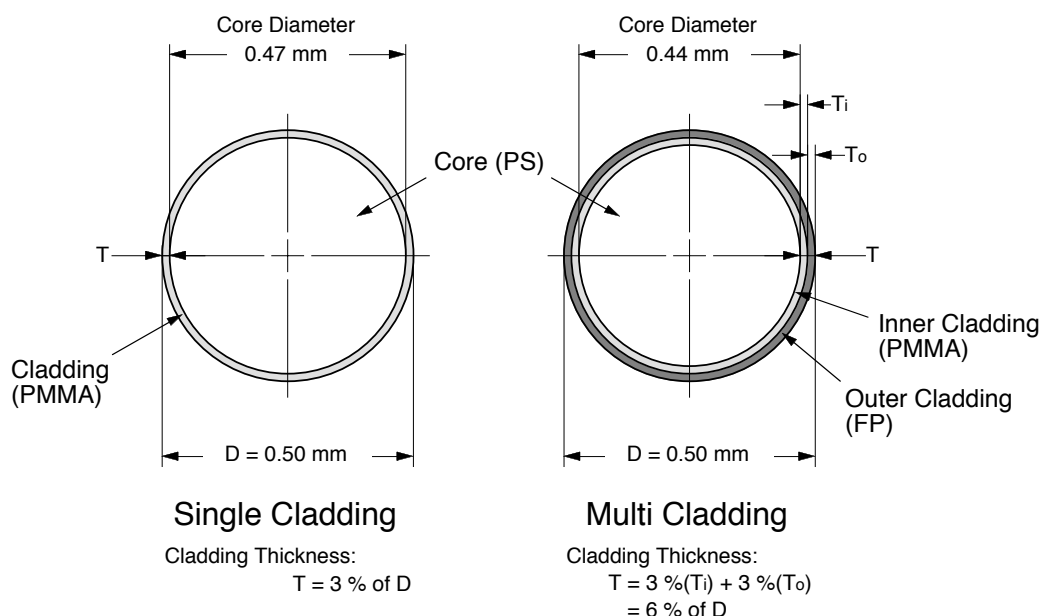


図 4.5: (左) シングルクラッド型、(右) マルチクラッド型ファイバーのクラッド構造。各クラッドの厚みはファイバー径の 3% である。マルチクラッド型は、Inner、Outer の 2 重のクラッド構造を持つ。0.5 mm 径ファイバーの場合のそれぞれのコア径を示した。

なわち光子の集率を大きくとれる利点がある。

シンチレーティングファイバーはコア材質のポリスチレン (PS) にシンチレーティング・ダイと呼ばれる励起発光する物質を混入させたものである。このダイの性質により、発光スペクトル、減衰時間等のシンチレーティングファイバーの性質が決められる。表 4.4 に、試作機および COMPASS 実験用の実機に我々が使用したクラレのシンチレーティングファイバーの特性をまとめた。ダイが混入されていない、通常の光ファイバーをクリアファイバーと呼ぶ。

表 4.3: クラレ・プラスチックファイバーのコア (Core) とクラッド (Cladding) の材質。コアはポリスチレン (PS) 製で、シングルクラッドおよびマルチクラッドの内側のクラッドに PMMA、マルチクラッドの外側のクラッドに FP が使用されている。それぞれの材質の屈折率 (Refractive index) と密度 (Density) を示した。

	Material	Refractive index	Density [g/cm ³]
Core	Polystyrene (PS)	1.59	1.05
Cladding	for single cladding	Polymethylmethacrylate (PMMA)	1.49
	inner for multi cladding	(PMMA)	1.19
	outer for multi cladding	Fluorinated polymer (FP)	1.42

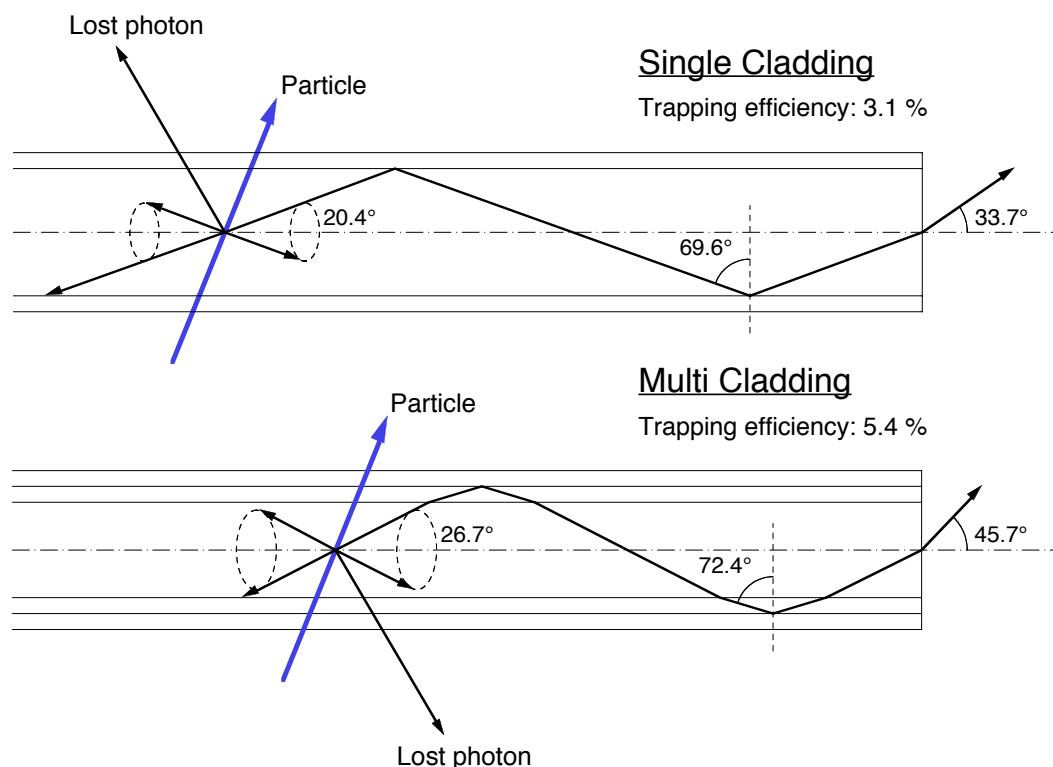


図 4.6: シングルクラッド型とマルチクラッド型ファイバーの光伝達の模式図。

SciFi トラッカーで達成される時間分解能は PSPM で得られる光電子数に大きく依存する。したがって、高エネルギーのミュオン等、発光量が小さい最小電離粒子を高い時間分解能で計測するにはファイバーの選択は重要な要素である。COMPASS グループにおいて、他社製のファイバーも含め数種類のファイバーに放射線源からの放射線を当ててテストし、最終的に、顕著に高い発光量を示した SCSF-78MJ ファイバーを採用した。このファイバーは一般に商品化されている SCSF-78M と構造および材質は全く共通だが、放射線損傷に対する耐性を強化したものである。

表 4.4: クラレ SCSF-38(M)、SCSF-78(M, MJ) の特性。型番の "M" はマルチクラッド型を示す。表に示した各パラメータは、発光される光の波長 (色 (Color) とピーク (Peak) の波長)、シンチレーション発光の減衰時間 (Decay Time)、ファイバーの減衰長 (Att. Leng.)。

Description	Emmission		Decay Time	Att. Leng.
	Color	Peak [nm]	[ns]	[m]
SCSF-38(M)	blue	428	2.3	>3.0
SCSF-78(M/MJ)	blue	437	2.4	>3.5

4.3.3 ファイバー・バンドルの製作工程

ここでは、ファイバー・バンドルの製作工程を詳しく説明する。ファイバー・バンドルの製作工程は大きく分けて

- (1) ファイバーの切断および接合端面の研摩(準備)
- (2) シンチレーティングファイバーとクリアファイバーの接着
- (3) レイヤーの接着
- (4) 重ね合わせ
- (5) ディスケットの接着、端面の研摩、マイラーの接着(仕上げ)

の5段階にわけられる。ファイバー・バンドル製作において重要なことは、シンチレーティングファイバーとクリアファイバーの接合面での高い伝達効率を保証することと、SciFiアレイ中のシンチレーティングファイバーの正確なアラインメントを保証することである。このために、上記手順(2)から(4)において、精密機械工作により製作した3種類の異なる特注の治具を使用する。これらの治具は、名古屋大学理学部物理金工室に依頼して製作を行った。

ファイバーの切断および接合面の研摩

最終的に、SciFiアレイを構成する各シンチレーティングファイバーは有感領域の大きさとほぼ同じ5 cm から6 cm の長さのカットされるが、工程上の理由により、この時点では約13 cm に切断する。クリアファイバーは各ステーションごとに必要な長さ(50 ～ 300 cm)に切断する。全1,152 ファイバー・チャンネルに使用されるファイバーの本数は、各ファイバー・コラムが7本のファイバーで構成されるためシンチレーティングファイバー、クリアファイバー各約8,000本、合計で16,000本に及ぶ。

ファイバーを必要な長さに切断した後、シンチレーティングファイバーとクリアファイバーの接合のため、全ファイバーの一方の端面を研摩する。研摩の手順としては、まずダイヤモンド・カッターにより荒削りを行い、数段階にわけてサンドペーパーの目を細くしながら端面を滑らかにしていく。最終的には非常に目の細かい研摩フィルム、クロスを用いて仕上げを行う。研摩において特に注意すべきことは、荒削りの段階で端面を正確に直角に切断することと、切断面でクラッドが破壊されないようにすることである。これらが損なわれるとファイバー同士を接合したときに接合面で光がもれ、伝達効率が激減する。このために、ファイバーを専用の治具に隙間なく最密に敷き詰め、しっかりと固定し

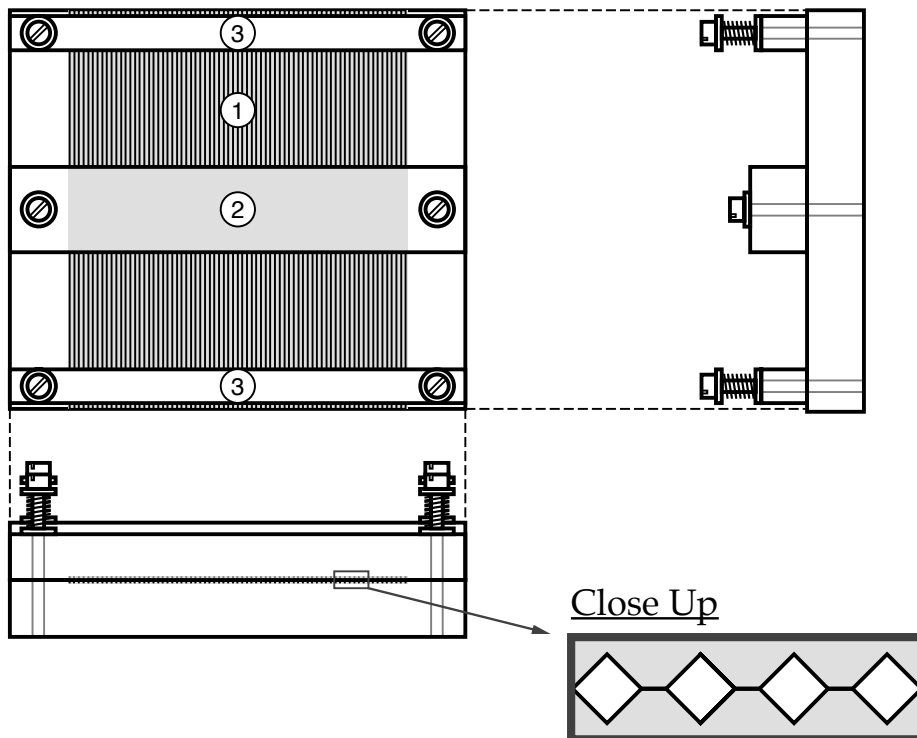


図 4.7: ファイバー接着用治具の組立図。底板 (1) には後述の精密な三角溝が刻まれている。図の上下からそれぞれシンチレーティングファイバー、クリアファイバーを溝に添わせて挿入し、光学接着剤で接着する。接着中は押さえ具 (2) と (3) でファイバーを固定しておく。押さえ具 (2) の裏側には拡大図 (Close Up) に示すように、(1) と同じ三角溝が切られており、ファイバーは上下の溝により、隣同士の間隔を一定に保たれる。

た状態で研磨を行う。固定した際にファイバー間に隙間があると、特にダイヤモンドカッター使用時や目の粗いサンドペーパーの使用時にクラッドが剥がれてしまうおそれがあるので、隙間が生じないように十分に注意しなければならない。特に、マルチクラッド型ファイバーの外側クラッドの FP 樹脂は剥がれやすく、細心の注意が要求される。ファイバーは研磨が完了するまで、この治具に固定しておく。研磨の各段階において、顕微鏡を用いて頻繁に端面の状態のチェックを行う。

シンチレーティングファイバーとクリアファイバーの接合

SciFi アレイの構造を形成する前に、まずシンチレーティングファイバーとクリアファイバーの接合を行う。接合には光学接着剤を用いる。この工程では、図 4.7 に示

Detail of the grooves

(grooved on Brass or Aluminium plate)

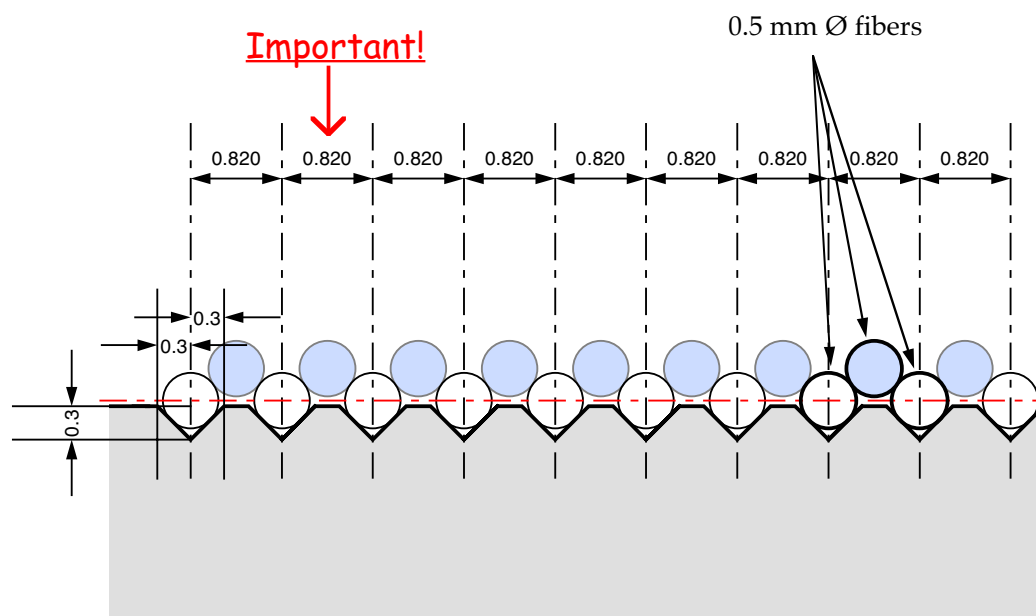


図 4.8: 治具表面の三角溝の概念図。隣接する溝のピッチは、SciFi アレイ中のコラム間ピッチの正確に 2 倍になっており、溝でファイバーの位置が決まる半層と、半ずらしに重ねられたもう一つの半層で 1 レイヤーを形成する。

した治具を使用する。治具の表面には、精密な機械工作によって図 4.8 に示したような三角溝が切られている。隣接する溝のピッチはファイバー・コラムのピッチの 2 倍、0.82 mm になっている。非常に精密な工作によって、ピッチの誤差は $10\ \mu\text{m}$ 程度に抑えられる。レイヤーの接着、重ね合わせの工程で使用する各治具にも、同じ三角溝が正確に切られている。

はじめに、図 4.9 のように治具の両側からそれぞれ半層分のシンチレーティングファイバーとクリアファイバーを敷き詰め、ファイバーの端面を正確に同一平面上に揃えて固定する。接着される端面の下に薄い ($6\ \mu\text{m}$ 厚) アルミ蒸着マイラー (大きさ $5\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 程度) を敷き、微量のオプティカルエポキシをたらす。ファイバー端面にエポキシがきちんと広がるように注意しながら端面同士を突き合わせてしっかりと密着させ、裏面に同じ溝を切った押さえ具 (図 4.7 の (2) のパーツ) で上から押さえる。この状態で約 1 日間乾燥させる。アルミ蒸着マイラーは接着部分の補強のために使用している。同時に、万が一接合部分で光のもれがあった場合に、この光が他のコラムにもれ込むのを防ぐ役割を果たす。

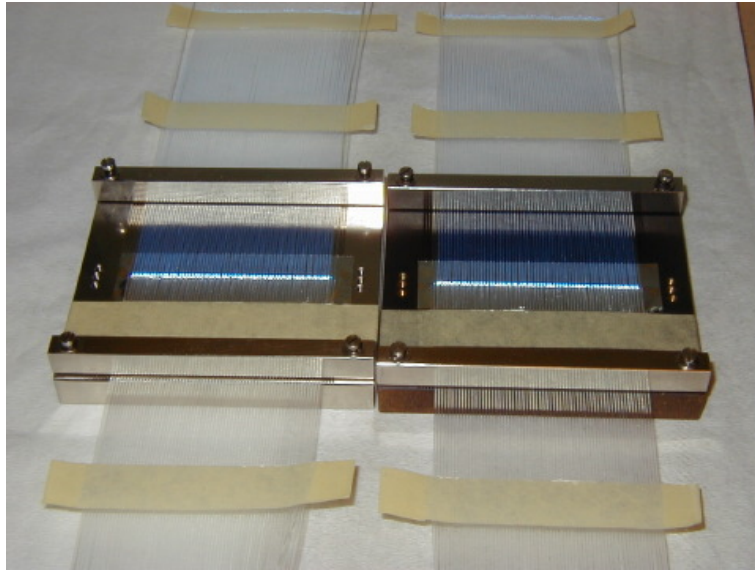


図 4.9: 接着のため治具に並べられた半層分のシンチレーティングファイバー (奥) とクリアファイバー (手前)。

接着が完了した時点で、半層分のファイバーがマイラー部分でシート状に繋がった状態になるが、接続部分を除いてはばらばらのままである。この時点で、マイラーに接着された接続部分においては隣り合ったファイバー同士の間隔が最終的なファイバー・コラムのピッチの正確に2倍になるように、各ファイバーの相対的な位置が決定している。この半層を、まず必要なレイヤー数分だけ先に製作していく。

レイヤーの接着 (ペインティング)

この工程でファイバーの接合によりできた半層2枚を重ねて接着し、1枚のレイヤーにする。レイヤーを形成した段階で、SciFi アレイ中のファイバーのアラインメントがほぼ決定する。したがって、この工程にも精密な三角溝を持つ治具を使用するが、この治具では、図 4.10 に示したような緩い曲面上に三角溝が切られている。

まず1枚目の半層を治具上に敷く。ここで、ペイントする部分 (アレイになる部分) の前後でファイバーを押さえ具によって固定し、各ファイバーを慎重に引っ張って、治具の曲面上の溝に沿わせる。ここで、半層の上から白ペンキを塗布していく。治具の曲面により、張力をかけるだけで各ファイバーは溝に押し付けられ、ペイント部分全体にわたってファイバーのアラインメントが保証される。

1枚目の半層が半乾きの状態になったら次の半層を、今度は治具の溝の代わりに1枚目の半層のファイバー間の谷間を利用して、半ずらしにこの上に敷く (図 4.8 参照)。先ほど

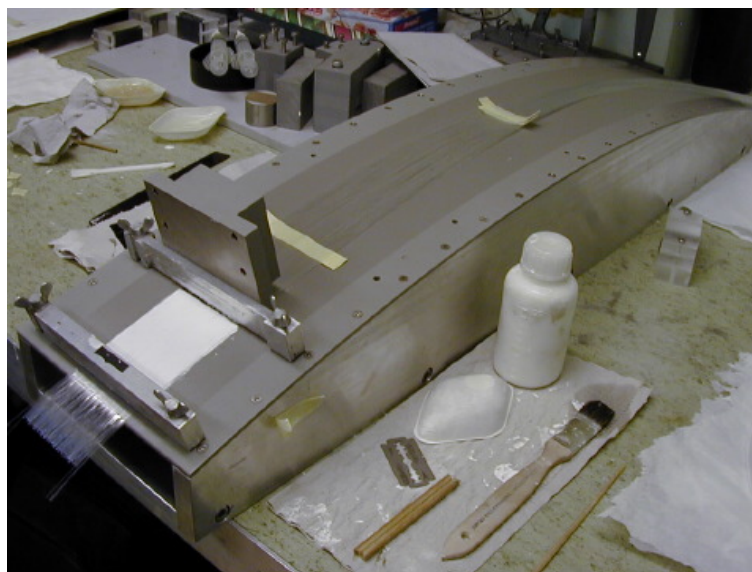


図 4.10: レイヤー・ペインティング用治具とペイント中の半層。

と同様にファイバーに張力をかけ、下の半層にしっかりと添わせる。さらにこの上から白ペイントを塗布し、完全に乾燥させる。これでレイヤーが完成する。レイヤーが形成された段階で、隣接コラムに対応する隣接するファイバー間のピッチは最終的なピッチ (0.41 mm) になっている。

重ね合わせ

この工程でレイヤーを7層重ね合わせ、SciFi アレイの構造を最終的に形成する。レイヤーが完成した段階でファイバーのアラインメントはほぼ固定しているが、重ね合わせで注意すべきことはレイヤーを押さえ付けたときに、ファイバーの間隔が広がってしまわないようにすることである。

ここでは図 4.11 に示した治具を使用する。治具の底板 (図の (1) の部品) には他の治具と同じ三角溝が切っており、最下層のレイヤーのアラインメントを保証する。2枚の側板の間隔は精密な工作により正確に最終的なアレイの幅と同じになっており、上から押さえ付けたときにレイヤーが広がるのを防ぐ。側板は、ビームホドスコープ・ステーションとターゲット・ステーションの異なる SciFi アレイの幅に合わせて、2種類の寸法で用意した。レイヤーは1層ずつ重ねていく。治具に敷いたレイヤーに白ペイントを塗布し、次のレイヤーを重ねて抑え具で固定して乾燥させる。前のレイヤーが半乾きになったところで次のレイヤーを重ね、順次繰り返していく。最終的に7層を重ね合わせたら、3日から4日間乾燥させる。これで SciFi アレイの構造が最終的に形成される。

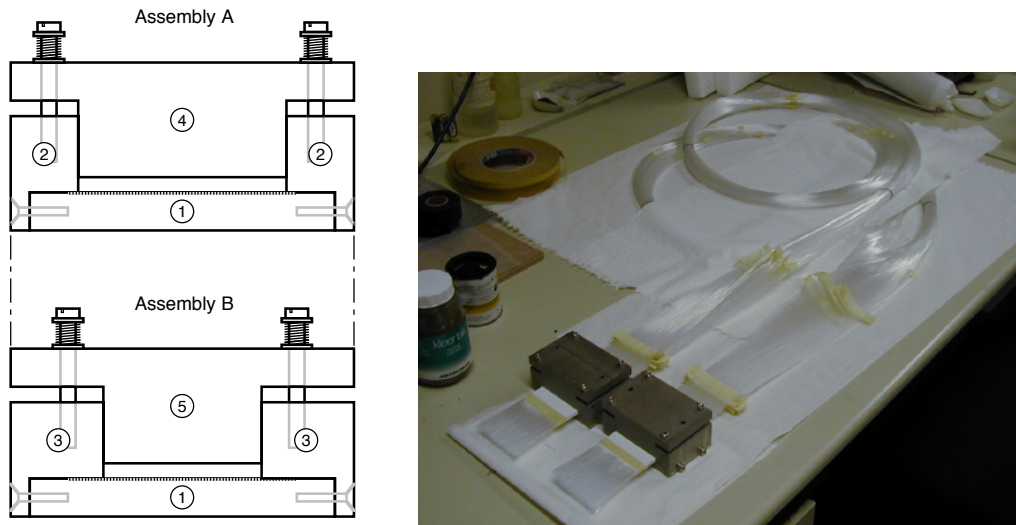


図 4.11: (左) レイヤー積み上げ用治具。(右) 7 層積み上げて乾燥中のファイバーバンドル。

ディスクットの接着、端面の研磨、マイラーの接着 (仕上げ)

SciFi アレイが乾燥したら、クリアファイバーの開放端にディスクットの取り付けを行う。1 個のディスクットには、PSPM 光電面の各ピクセルの中心に対応する位置に、 4×4 のマトリクス状に 16 個の穴が空けられている。SciFi アレイに接続されている、各コラムにつき 7 本のクリアファイバーを他方の端でまとめてそれぞれ順番に対応する穴に挿入し、エポキシ系接着剤を注入して接着を行う。接着剤が完全に乾いたら、余分にはみだしたファイバーと接着剤をカットし、サンドペーパーと研磨フィルム、クロス等を使ってディスクットの表面ごと研磨していく。ここでも顕微鏡を用いて、ファイバー端面に傷がないように頻繁にチェックする。

次に SciFi アレイの開放端を、接合部からの SciFi の長さが有感領域の大きさより約 5 mm 長くなるところで切断し、この切断面を前に述べたのと同じ方法で研磨する。最後にこの研磨した端面に、オプティカルエポキシでアルミ蒸着マイラーを接着する。以上でファイバー・バンドルが完成する。

4.4 位置感応型光電子増倍管 (PSPM)

位置感応型光電子増倍管 (PSPM) の選択は、CERN の DIRAC (PS212) 実験用 SciFi ホドスコープで使用され、すでに確認されていた浜松ホトニクス の H6568[77] の優れた性質を考慮し、これを採用した。

この PSPM は $17.5 \times 17.5 \text{ mm}^2$ の光電面上に各 $4 \times 4 \text{ mm}^2$ の方形の 16 個のピクセルを

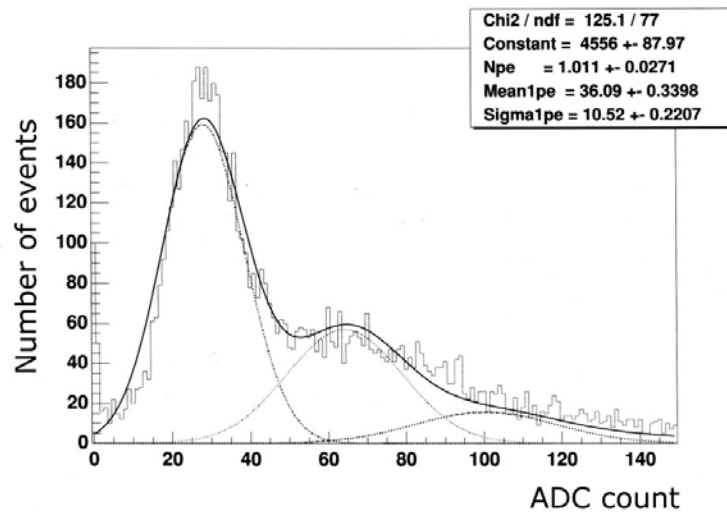


図 4.12: H6568 で得られた単一光電子ピーク。弱い光パルスを入射して測定を行った。単一光電子ピークがノイズと明確に分離されているだけでなく、2 光電子ピークもはっきりと見える。また、ポアソン分布とガウス分布で計算したフィット曲線とよい一致を見せている。

持つ。ピクセルは 4×4 のマトリクス状に配置され、ピッチは 4.5 mm である。各ピクセルで生成した光電子は 12 段のメタルチャンネル・ダイノードに入射して対応するチャンネル内部で増幅され、ピクセルと同じ 4×4 のマトリクス状に配置された 16 個の独立なアノード電極のうちの対応するアノード電極で読み出される。H6568 ではこのような構造が非常にコンパクトなデザイン (45 mm $\times$ 30 mm $\times$ 30 mm、重量 55 g) に集積されており、SciFi トラッカーでの使用に最適である。

バイアルカリの光電面で検出される波長領域は 300 ~ 650 nm である。量子効率 は波長 420 nm に対して最大値約 20% を得る。標準的なゲインは印加電圧 800 V で 3×10^6 、700 V で 1×10^6 程度であり、COMPASS-SciFi トラッカーの仕様 (光電子数約 15 個) であれば、600 V 程度でもプリアンプなしで使用可能である。開発研究において確認した範囲では、単一 PSPM 内での各チャンネル間の増幅率のばらつきは 10% 程度であった。メーカーによれば、量子効率のばらつきは PSPM 個体間で最大 20% 程度である。ゲインと量子効率で決まる PSPM 個体間での出力 (陽極感度) のばらつきは、我々のテストした 76 本の PSPM において $\pm 50\%$ 程度であった。PSPM 内のチャンネル間クロストークは約 1% である。また、この PSPM はアノードパルスの立ち上がり時間 0.83 ns (標準値)、transit time spread が 0.3 ns (FWHM) という優れた時間特性を示す。

加えて、この PSPM は外部磁場に対して非常に高い耐性を示す。開発研究において PSPM の磁場中での動作を調べた結果、50 G (= 5 mT) までの異なる方向の外部磁場に対して出力の低下は 20% 以下であった。これらのテスト結果は、後に 5.5 節で詳しく述べる。

H6568 の特筆すべき特徴として、単一光電子ピークがノイズと極めて明確に分離されて得られることがあげられる。図 4.12 に、非常に弱い光信号を入射して得られた信号波高スペクトルを示す。ポアソン分布とガウス分布で計算したフィット曲線を同じ図に示したが、単一光電子ピーク、2 光電子ピークが理論値と極めてよい一致を示しているのがわかる。H6568 のこの性能により、特に次節に述べるような適切な信号処理回路と組み合わせることで、ヒットマルチプリシティ等の SciFi トラッカーの飛跡測定性能を顕著に向上させることができる。

我々は、一般に商品化されている型の H6568 と比較して以下の点で改造を施した H6568-MOD を使用している。まず、最終ダイノードの信号を読み出すことができるようにラストダイノード出力を装備した。これは、全 16 チャンネルのアノード信号のアナログ和に相当する信号であり、PSPM の出力信号波高のモニターや、トリガーの目的で使用される。さらに高計数率で使用するため、最終段から 4 段のダイノード (Dy9-Dy12) にブースター・ケーブルを装備した。このケーブルを用いて、最終 4 段のダイノードには独立にブースター電圧を供給することが可能である。これにより、高計数率時にダイノード電流の増加によって生じる最終段付近のダイノードの電圧降下と、それに伴うゲインの変動を防ぐことができる。H6568 でブースターを使用した場合の、非常に高い計数率での出力の変化については、鳥光悟 [78] に詳しく調べられている。ブースターの最も単純な手法は各段のダイノードに独立な高圧電源を接続し、使用方法であり、次章に述べる試作機のテスト実験ではこの方法を用いた。COMPASS 実験用 SciFi トラッカーの実機では使用する PSPM の本数が多く、この方法だと大量の高圧電源チャンネルを必要とするので、使用する高圧電源のチャンネル数を抑えるために外部にアクティブ・ブースター回路を接続して使用した。実機に使用したブースター回路については、後の 6.1.2 で詳しく述べる。

4.5 ピークセンシング・ディスクリミネーター

SciFi トラッカーの PSPM の出力信号は、ディスクリミネーター回路を通して TDC による読み出しを行う。本節では、SciFi トラッカーと並行して開発したピークセンシング・ディスクリミネーター (Peak-Sensing Circuit discriminator; PSC) について解説する。

PSC は隣接チャンネル間の信号波高の差を感知する機能を持ったディスクリミネーター回路である。PSC については Gorin [79] によって詳しく記述されている。PSC は CERN の RD-17 (FAROS) コラボレーションによって最初に開発が行われ、DIRAC (CERN-PS212) 実験において実用化されている。

図 4.13 は、PSC の原理を模式的に示したものである。PSC は 1 チャンネルの入力チャンネルに対し、隣接する 2 チャンネルとの間で入力信号波高の引算を行う。すなわち、あるチャンネルに対し隣接するチャンネルに同時に入力信号があった場合、隣接チャンネル

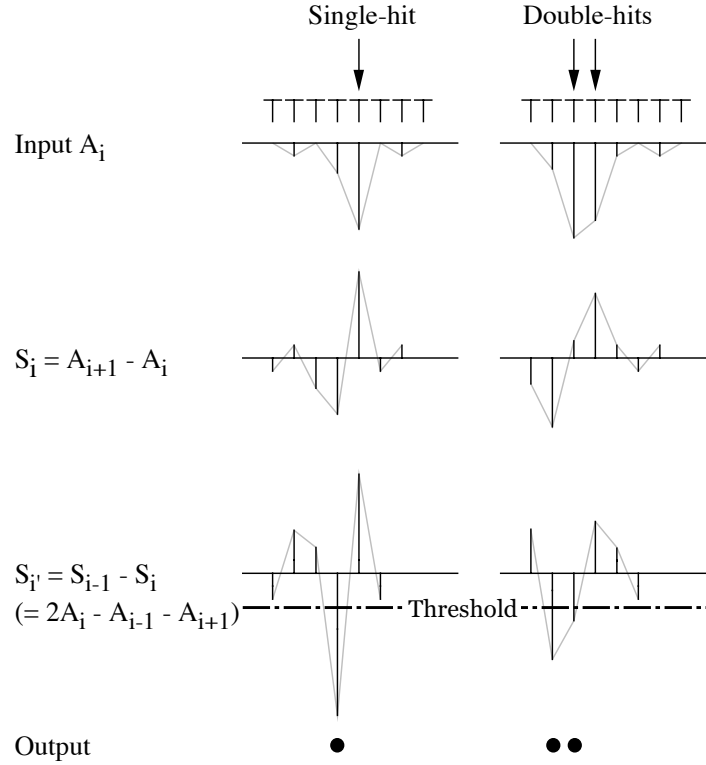


図 4.13: ピークセンシング回路 (PSC) の原理。

と比較して顕著に小さな信号は排除され、主要なチャンネルのみからデジタル信号が出力される。この機能により、閾電圧を適切に調整することでクロストークに起因する隣接チャンネルの同時ヒットは排除され、粒子の通過位置に対応する 1 チャンネルのみがヒットする。PSC を SciFi トラッカーの読み出しに使用することで、SciFi トラッカーの性質上、ファイバー・バンドル内での光信号の生成、伝達の過程で発生しやすいクロストークの影響を排除し、リアルタイムで正確な粒子の入射位置を特定することが可能になる。

この機能の効果は上記参考文献に明確に示されている。PSC と、通常の閾値タイプ (Leading Edge) のディスクリミネーターとでマルチヒットイベント (あるいは単一ヒットイベント) の計測確率を比較すると、その差をはっきりと見ることができる。図 4.14 は、PSC と Leading Edge ディスクリミネーターを使用して、ある特定のチャンネルを粒子が通過したイベントに対して SciFi トラッカー各チャンネルで検出されるイベント数をプロットしたものである。このとき、各ディスクリミネーターで同等の検出効率が得られるように閾電圧を調整してある。Leading Edge の場合は粒子の通過チャンネルだけでなく周辺のチャン

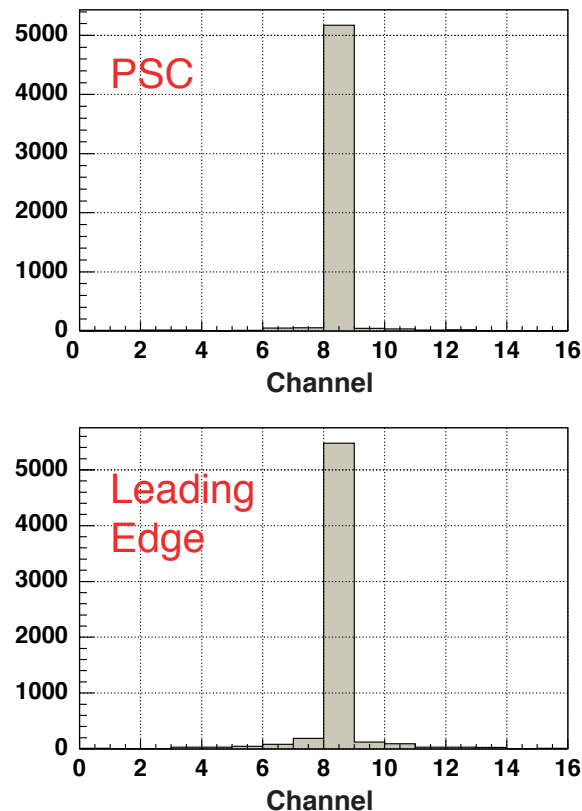


図 4.14: SciFi の第 9 コラムのみを粒子が通過したイベントに対する飛跡分布。横軸はチャンネル番号を表す。(上) PSC (下) リーディングエッジ・ディスクリミネーターを使用したもの。ともに検出効率が約 98 % になるように閾電圧を調整した。リーディングエッジ・ディスクリミネーター使用による分布では、周辺チャンネルへの信号の洩れ出しが見られる。

ネルにもイベントが検出されているが、PSC では殆ど 1 チャンネルのみがヒットしているのが確認できる。

このように、PSC を使用することで SciFi トラッカーの高い検出効率を保ちながらヒットマルチプリシティを低く抑えることができ、1 個の入射粒子に対してただ 1 チャンネルのみから信号が検出される、という理想的な飛跡検出器に近い性能が実現される。マルチプリシティを抑えることは、COMPASS-SciFi トラッカーのような極めて高い計数率で使用する検出器においては、正味の不感時間を抑制することにも繋がる。

我々は、DIRAC 実験で実用化されている PSC のデザインに基づいて、これを COMPASS-SciFi トラッカーで使用するために高計数率への対応、高い時間分解能の実現と大量のチャンネルの取り扱いを目標として PSC の開発を行った。

COMPASS 用の PSC モジュールは、Euro-Mechanics 規格の 3U の高さを持ち、1 枚のプリント基板で 16 チャンネルの入力と 16 チャンネルのデジタル出力を持つ。すなわち、

表 4.5: COMPASS 用 PSC モジュールの基本仕様。

Parameter	Value/Description
Input	16 channels, negative
Input impedance	50 Ω
Output	16 twisted pairs
Output impedance	100 Ω
Output pulse level	LVDS
Output pulse width	8 ns
Double pulse resolution	~ 15 ns
Threshold level range	5 to 100 mV
Remote protocol	RS485
Height	3U Euro mechanics standard

PSPM あたり 1 台の PSC モジュールを接続する。デジタル信号の出力は LVDS (Low Voltage Differential Signal) レベルでパルス幅は約 8 ns である。LVDS レベルの出力は 3.4.2 に解説した COMPASS-DAQ システムの F1-TDC により要求された。高計数率での使用のため不感時間は 7 ns 程度まで縮小され、結果として 2 パルス分解能 15 ns 程度を実現した。これは、チャンネルあたり 1 MHz の計数率の場合で 1.5% の不感時間に相当する。PSC 各チャンネルの閾電圧は 5 $\sim$ 100 mV の範囲で個別に設定可能であり、RS485 プロトコルを使用した PC からのリモートコントロールで調整できる。RS485 は最大で 8×31 台のディスクリミネーターを取り扱うことができる。閾電圧の設定値は 8 bit の EEPROM チップに記憶させることができるので、一度設定すれば電源をカットし、ディスクリミネーターを取り外しても設定値が失われることはない。加えて、このモジュールではラストダイノード信号のアナログ出力のために、ゲイン約 10 倍の極性反転型プリアンプを同じプリント基板上に搭載した。以上の COMPASS-SciFi 用 PSC モジュールの仕様を表 4.5 にまとめた。

COMPASS 実験用 SciFi トラッカーの実機においては、PSC をそれぞれ固有の PSPM とセットでモジュール化して使用した。各 PSPM の出力は、長さ 30 cm 以下の同軸ケーブルを用いて対応する PSC の基板上に直接ハンダ付けで接続される。PSC 各チャンネルの閾電圧は、モジュールの実機への取り付け前にチューニング用ファイバー・バンドルを用いたテストビームにおいて、対応する PSPM チャンネルの出力に合わせてプレチューニングされる。ファイバー・バンドルの各チャンネルから得られる光出力がほぼ均一であるのに比較して PSPM チャンネル間でのゲインのばらつきは大きいため、この手法は極めて有効に働く。我々はこのプレチューニングのみで、約 100 チャンネルの実機のプレーン全体に渡ってほぼ均一で 100% 近い高い検出効率が得られることを実験によって確認した。PSC のチューニングに関しては、後の 6.1.4 章に詳しく述べる。

第5章

高時間分解能、高計数率型シンチレーティングファイバー・トラッカーの開発研究

私は1997年よりCOMPASS実験用シンチレーティングファイバー (SciFi) トラッカーの実用化を実際的な目標に据えて、位置感応型光電子増倍管 (PSPM) を用いた高時間分解能を持つ高計数率型 SciFi トラッカーの開発研究を行ってきた。この開発研究で目標とした性能をまとめると、以下のようになる。

- (1) 2×10^8 muons/spill の大強度ビーム入射による、最大で約 10^7 particles/cm²·s のビームフラックスに対応できる高計数率耐性。
- (2) 400 ps (rms) 以下の高い時間分解能。
- (3) 200 μ m (rms) 以下の位置分解能。
- (4) 高い検出効率と低いヒットマルチプリシティ (≈ 1) を同時に満たす、高い飛跡位置測定性能。
- (5) 最大 3 m 程度までの長いライトガイドを使用した SciFi トラッカーでの上記高性能の実現。

我々は、特にこれまでに実用化されている飛跡測定器では実現されていない(1)の高計数率耐性と(2)の高時間分解能を開発の中心的な目標とした。高い時間分解能を得るためには、ファイバー・バンドルから得られる光量を増やすのが最も有効な手段である。したがって、開発研究では数種類の異なるファイバーを使用し、異なるファイバー・バンドルの構造を持つ試作機を製作して、テストを繰り返した。また、COMPASS-SciFi トラッカーの実用化においては、(5)の長いライトガイドを使用した SciFi トラッカーで十分な性能を得ることが非常に重要である。そこで、まず開発の初期段階で長さ 2 m のライトガイドを使用した試作機を製作し、テストビームで時間分解能の測定を行った。この結果を 5.1 節で示す。5.2 節では、シングルクラッド型ファイバーとマルチクラッド型ファイバー

を使用して製作した試作機の性能の比較を行ったテストについて述べる。これらのテストの結果を踏まえ、COMPASS 実験用 SciFi トラッカーの第一次的な設計を行った。最終的な仕様を決定するために、現実的な仕様で3種類の異なるファイバー・バンドルの構造を持つ試作機を製作し、詳細な性能評価を行った。この結果について、5.3 節で述べる。ここまでのテストにより、比較的低い入射粒子のフラックスで所期の性能が得られたため、最終的に COMPASS の実験エリアで実際に試作機に 2×10^8 muons/spill の大強度ミュオンビームを入射し、高計数率条件での性能テストを行った。この結果を 5.4 節で示す。また、5.5 節において、PSPM の磁気シールドの効果を調べるために行ったベンチテストについて述べる。

5.1 2m ライトガイドを持つ試作機の時間分解能の測定

COMPASS 実験用 SciFi トラッカー開発の最大の課題の一つである、SF3 および SF4 に必要な 2 ~ 3 m の長さのライトガイドを使用した場合の検出器の性能を調べるために、2 m のライトガイドを持つ試作機を製作し、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 田無分室の電子シンクロトロン $\gamma 3$ ビームラインにて 450 MeV/c の電子ビームを使用してテストを行った。

5.1.1 検出器の概要

このテストのために、図 5.1 に示した 10 レイヤー (SF1) と 6 レイヤー (SF2) の 2 台の試作機を製作した。シンチレーティングファイバーはクラレのシングルクラッド型ファイバー SCSF-38 の直径 0.5 mm を使用した。SciFi アレイは最密詰めの構造で製作されており、ファイバー・コラム間のピッチは 0.433 mm になっている。シングルクラッド型の場合、コアの直径は 0.47 mm である。各アレイは 40 個のファイバー・コラムで構成されている。

この二つのファイバー・バンドルは日星電気に依頼して製作を行ったもので、前章に解説した製作工程とは異なる方法で製作されている。図 5.2 に示したように、約 20 cm の長さにカットされたシンチレーティングファイバーは端から 10 cm までがアレイ状に積まれている。残りの 10 cm の部分は固定されておらず、後で述べるようにライトガイドに接合される。ここでもアレイの形成には白ペイントを使用している。SciFi アレイは補強のため、完成した後エポキシ系接着剤でコーティングした。10 レイヤーの SF1 には、アレイの開放端面に反射材としてアルミ蒸着を施した。一方で 6 レイヤーの SF2 にはこの処理を行わなかった。したがって、2 台の検出器の性能の比較を行うことで、間接的ではあるが、反射材の効果を知ることができる。

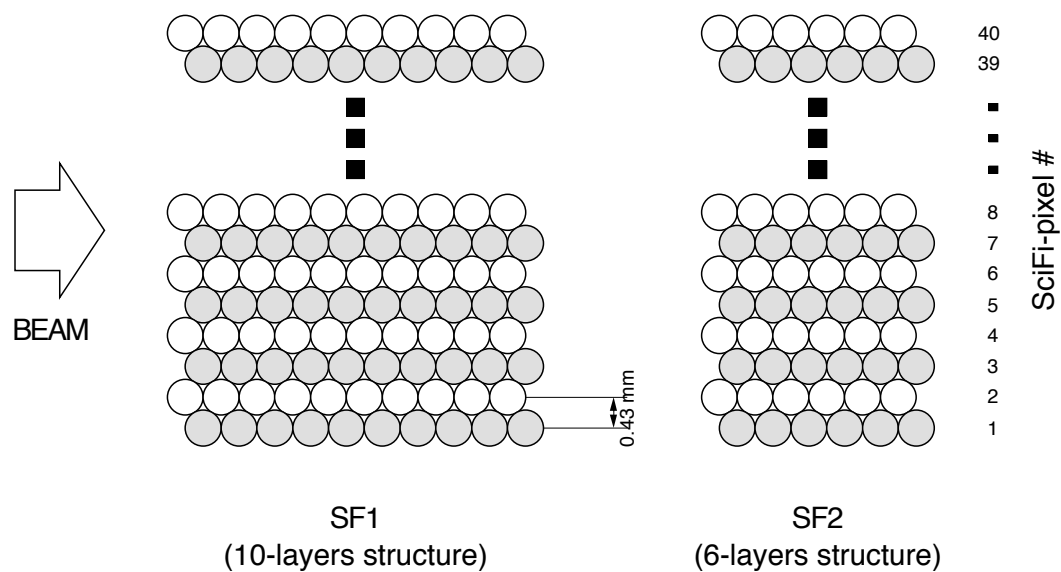


図 5.1: 10 および 6 レイヤー構造の SciFi アレイの断面図。

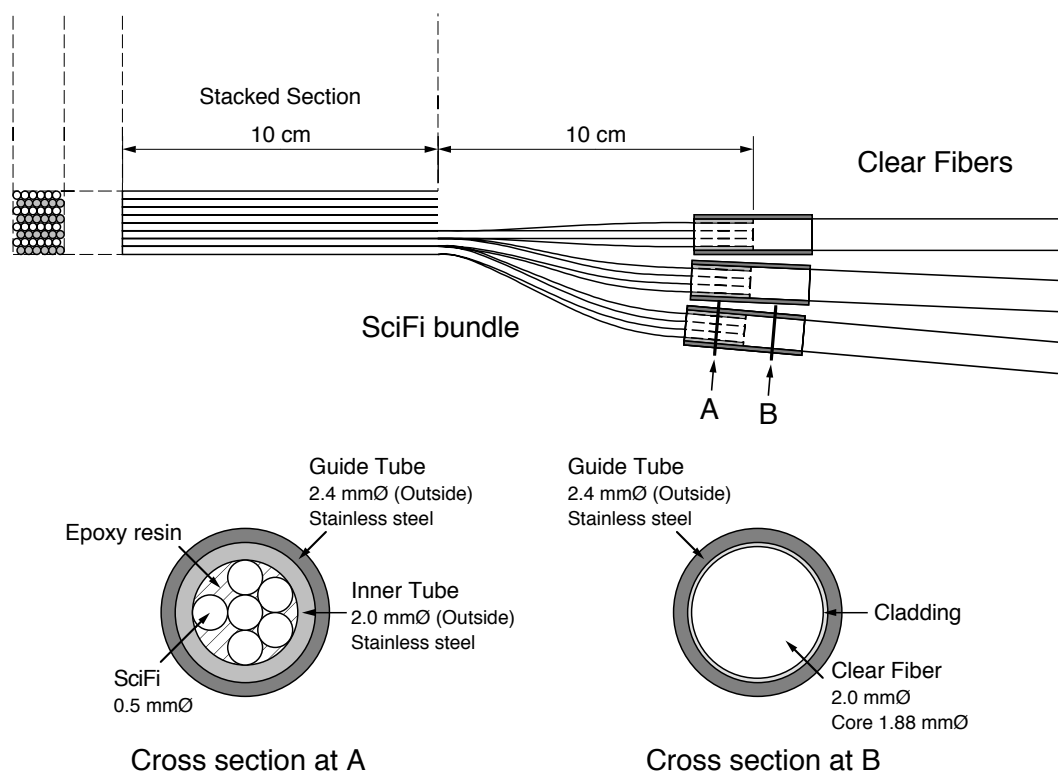


図 5.2: SciFi アレイとライトガイドの接続の概念図。

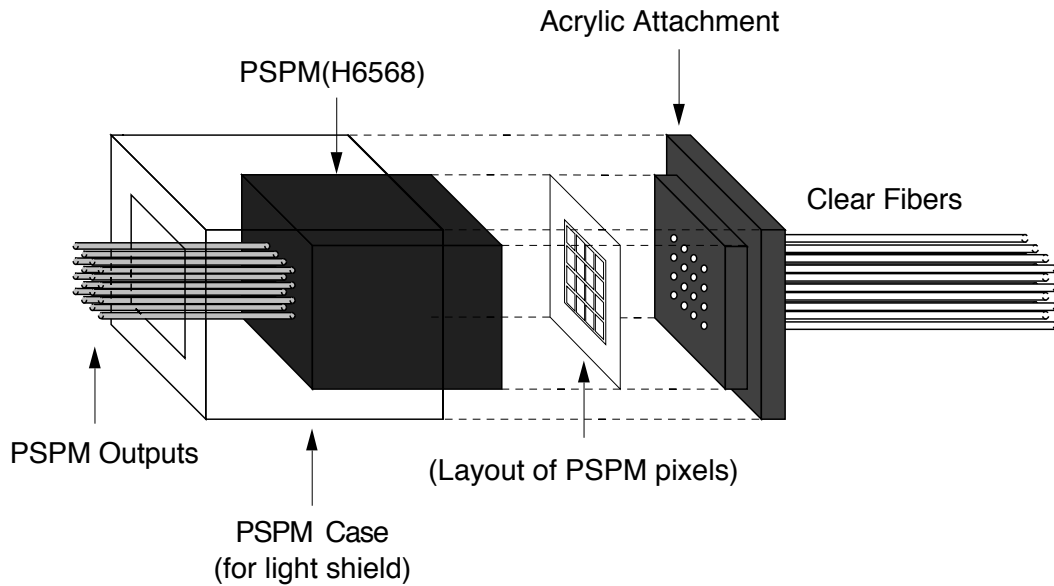


図 5.3: ライトガイドと PSPM の接続用アタッチメント (ディスクット)。

ライトガイドには直径 2.0 mm のクリアファイバー Clear-PS を使用した。クリアファイバーの長さは 2 m とした。図 5.2 に示したように、シンチレーティングファイバーはコラム分ごとにまとめられ、ステンレス製のガイドチューブを利用してクリアファイバー端面に接続されている。図 5.2 には 6 レイヤーの場合の接続面でのファイバーの配置の様子が示されている。端面同士を突き合わせた後、ガイドチューブにエポキシ系接着剤を注入して固定し、熱融着によってファイバー同士を接合した。クリアファイバーの開放端は図 5.3 のようにディスクットを用いて PSPM の光電面に接続される。PSPM は H6568 を使用した。

5.1.2 実験条件

KEK 田無分室の $\gamma 3$ ビームライン上のセットアップ図を図 5.4 に示す。450 MeV/c の電子ビームはビームカウンター B1 と B2 で定義される。B1 と B2 のサイズは各 $5^W \times 30^H \times 10^L \text{ mm}^3$ 、 $10^W \times 30^H \times 5^L \text{ mm}^3$ である。各ビームカウンターは、定義された全てのビーム粒子が SF1 と SF2 の有感領域を通過するように設置した。T1 と T2 は 80 ps (rms) の非常に高い時間分解能を持つシンチレーションカウンターで、大きさは共に $30^W \times 50^H \times 10^L \text{ mm}^3$ である。トリガーは B1、B2 と T1 の同時計測により定義し、タイミングは T1 で決定した。典型的なトリガーレートは毎秒 7 カウントと非常に低いものであった。

時間分解能の測定では、PSPM の出力をコンスタントフラクション・ディスクリミネー

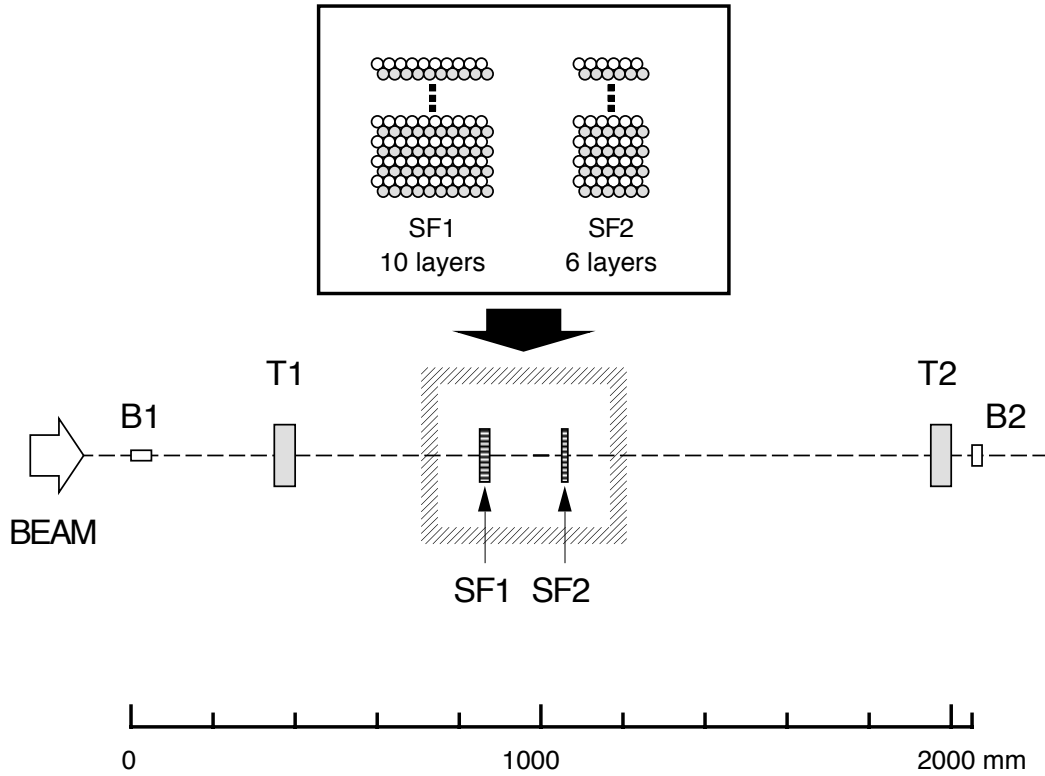


図 5.4: $\gamma 3$ ビームライン上の実験装置のセットアップ。

ター (CFD) を通して CAMAC の TDC に接続した。PSPM の出力パルスの減衰を避けるために、CFD は実験エリア内の SciFi トラッカー近傍に設置した。閾電圧は 30 mV に設定した。これは後に示す ADC スペクトルで約 15 ADC counts に相当する。

光出力の測定時には、PSPM の出力は長さ 33 m の同軸ケーブルを通して CAMAC の ADC に接続した。

5.1.3 時間分解能

図 5.5 に、SF1 について得られた TDC スペクトルを示す。各ヒストグラムは (a) T2–T1、(b) SF1–T1、(c) SF1–T2 の時間差の分布である。これらの時間差分布は、各々に関係する 2 台の検出器の時間分解能を含む。すなわち、(a)、(b)、(c) の分布の幅をそれぞれ σ_a 、 σ_b 、 σ_c とすると各検出器の時間分解能 σ_{T1} 、 σ_{T2} 、 σ_{SF1} を用いて、以下の式が成り立つ。

$$\begin{aligned}
 \sigma_a^2 &= \sigma_{T2}^2 + \sigma_{T1}^2 \\
 \sigma_b^2 &= \sigma_{SF1}^2 + \sigma_{T1}^2 \\
 \sigma_c^2 &= \sigma_{SF1}^2 + \sigma_{T2}^2
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

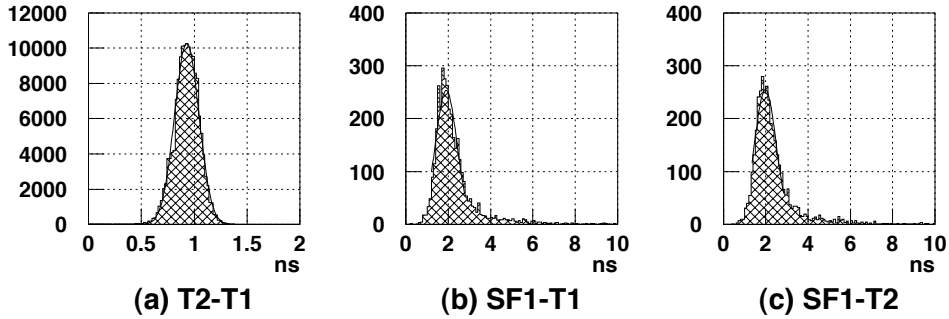


図 5.5: 10 レイヤーの試作機 SF1 の時間分解能測定で得られた関連のある検出器の 3 種類の組み合わせによる時間差分布。各分布の幅は、関連する 2 つの検出器の時間分解能を含んでいる (5.2 式参照)。

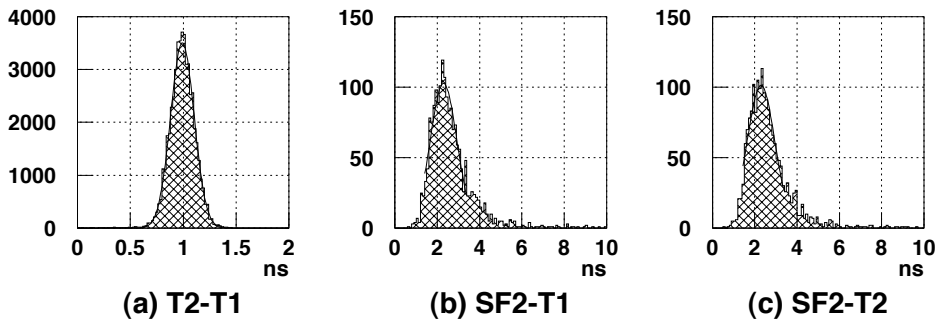


図 5.6: 6 レイヤーの試作機 SF2 の時間分解能測定で得られた関連のある検出器の 3 種類の組み合わせによる時間差分布。

これにより、 $\sigma_{SF1} \sim 430 \text{ ps}$ 、 $\sigma_{T1,T2} \sim 80 \text{ ps}$ が得られた。同様にして、図 5.6 に示したスペクトルから $\sigma_{SF2} \sim 720 \text{ ps}$ を得た。

5.1.4 信号波高分布

図 5.7 は、各試作機のあるチャンネルから得られた信号波高分布である。10 ADC counts 付近に見られる鋭いピークは単一光電子イベントによるピークである。単一光電子ピークは、粒子が傾きを持って入射し、測定チャンネルに対応するファイバー・コラムを部分的に掠めたイベントと、隣接コラムを粒子が通過して生成された顕著な光信号による光の漏

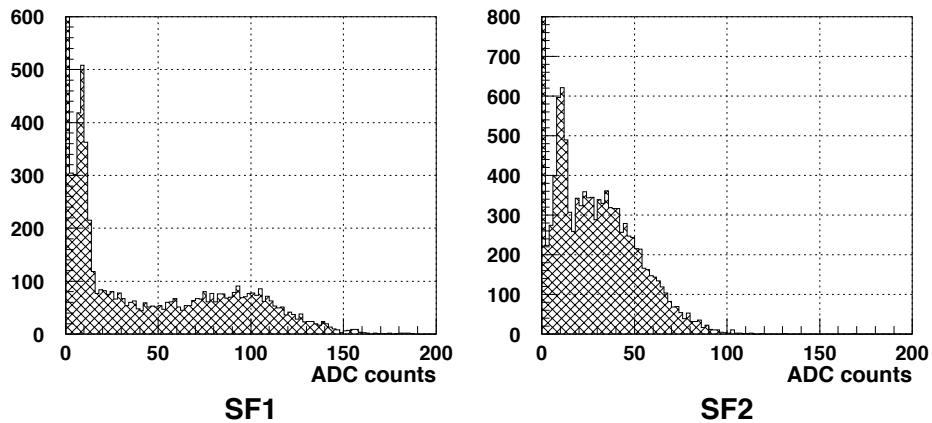


図 5.7: 各プレーンのあるチャンネルから得られた信号波高分布。

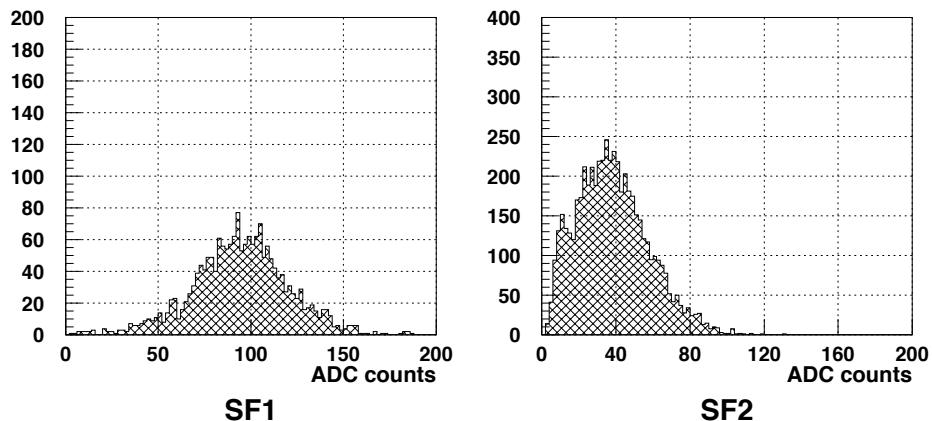


図 5.8: 単一ヒットイベントでカットをかけた信号波高分布。

れこみによって主に生成され则认为られている。高波高に見られる幅の広いピークが、このチャンネルに対応するコラム自身を粒子が貫通したイベントによるものである。

図 5.8 に示したのは、顕著な信号がこのチャンネルのみから検出されたイベントだけを抽出して得られた信号波高スペクトルである。単一光電子ピークはほぼ完全になくなり、スペクトルは予想通り幅の広いガウス分布あるいはポアソン分布の形状を示している。PSPM 出力のこの領域での線形性を仮定すれば、図 5.8 のピークの位置と単一光電子ピークの位置から、各試作機での生成光電子数を見積もることができる。その結果、SF1 で 10

5.2. マルチクラッド型ファイバーとシングルクラッド型ファイバーによる試作機の性能比較

個、SF2 で 3 個の光電子が平均的に得られていることがわかった。

SciFi トラッカーで得られる平均生成光電子数はレイヤー数に比例すると考えられるので、上の結果をもとに単純な計算を行って、アルミ蒸着で形成した反射材の効果を見積もることができる。結果として、この反射材によってファイバー・コラム中で生成された光子の収集効率が約 2 倍に増えていることがわかった。

以上の結果から、長さ 2 m のライトガイドを使用しても十分な光電子数が得られれば、COMPASS で要求される時間分解能が到達可能であることが確認された。

5.2 マルチクラッド型ファイバーとシングルクラッド型ファイバーによる試作機の性能比較

高い時間分解能を得るためには、生成光電子数を増やすことが最も効果的である。そのためには、使用するシンチレーティングファイバーの選択は一つの重要な要素である。そこで、マルチクラッド型ファイバーを用いた試作機を製作し、シングルクラッド型ファイバーを用いた試作機と光出力の比較を行った。テストは CERN の陽子シンクロトロン (PS) の T11 ビームラインにて 3.6 GeV/c ハドロンビームを用いて行った。

5.2.1 検出器およびテスト実験の概要

このテストでは、マルチクラッド型ファイバーとシングルクラッド型ファイバーを使用し、それぞれ 7 レイヤー、16 チャンネルのファイバー・バンドルを製作した。このファイバー・バンドルではクリアファイバー・ライトガイドを使用せず、長さ約 25 cm のシンチレーティングファイバーを端から約 10 cm の部分で積み重ねて SciFi アレイを形成し、残りの 15 cm の端を直接 PSPM に接続する形をとった。

シンチレーティングファイバーは、クラレの SCSF-38M(マルチクラッド型)および SCSF-38(シングルクラッド型)をそれぞれ使用した。ここではマルチクラッド型ファイバーを用いたファイバー・バンドル 2 プレーン (A、B) とシングルクラッド型ファイバーを用いた 1 プレーン (C) の計 3 プレーンを製作し、テストした。PSPM は H6568 を使用した。SciFi アレイの構造については次の 5.3 節で述べるテスト実験とほぼ同一なので、ここでは割愛する。

このテストでは、マルチクラッドとシングルクラッドとの比較だけでなく、異なる種類のディスクリミネーターを使用した時間分解能の測定も行った。すなわち、一般的なリーディングエッジ閾値型ディスクリミネーター (LED)、コンスタントフラクショナル・ディスクリミネーター (CFD) と、ピークセンシング・ディスクリミネーター (PSC) の 3 種類を使

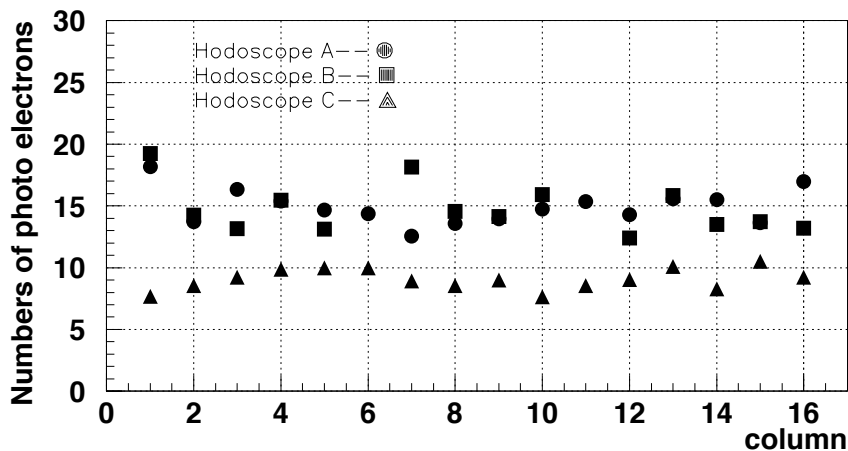


図 5.9: 各プレーンの各チャンネルで得られた生成光電子数の比較。

用した。LED は LeCroy 623A、CFD は ORTEC 934 を使用した。PSC は、DIRAC 実験用に設計されたモジュールを使用した。時間分解能の測定は、各ディスクリミネーターの出力を CAMAC の TDC (LeCroy 2228A) に接続して行った。

5.2.2 生成光電子数の測定

前節と同様に、単一光電子ピークを利用して各試作機プレーンから得られる平均生成光電子数を見積もった。図 5.9 は、各プレーンの 16 個の各ファイバー・コラムで得られた生成光電子数をコラム番号に対してプロットしたものである。平均生成光電子数は、A、B プレーンで 15 個、C プレーンで 9 個という結果が得られた。これらの単純な比較により、マルチクラッド型ファイバーを使用することで光出力が約 60 ~ 70% 増加する、という結論を得た。この値は、マルチクラッド型ファイバーとシングルクラッド型ファイバーの全反射の角度アクセプタンスの差から予想される値と一致する。

5.2.3 時間分解能

試作機プレーン A、B のあるファイバー・コラムについて、時間分解能の測定を行った。表 5.1 に、各ディスクリミネーターを使用して得られた結果をまとめた。

このテストでは、LED と比較して PSC で顕著に高い時間分解能が得られたが、後の解析で、このときの PSC の閾電圧が低すぎたことが判明した (検出効率 99.96%、マルチプリシティ約 1.5)。後の 5.3.7 節で詳しく述べるように、時間分解能はディスクリミネーター

5.3. 構造の異なるファイバー・バンドルを持つ SCIFI 検出器の基本性能テスト

表 5.1: 3 種類のディスクリミネーターを使用した時間分解能の測定結果。

Discriminator circuit	Time resolution (rms) (ps)	Time resolution (FWHM) (ps)
LED	390	916
CFD	290	682
PSC	315	740

の閾値に依存する。閾値が低すぎる場合、ノイズやクロストークによる偽のヒットが検出されるようになるので、正確な飛跡測定のためには適切な閾値の設定が重要であり、検出効率とマルチプリシティは閾値が適切かどうかの指標になる。したがって、ここで得られた PSC の結果は飛跡測定器としての現実的な条件で得られたとは言えないが、PSC の使用で得られる時間分解能の下限を示していると言える。PSC 使用による時間分解能の測定は、次章以降に示すテスト実験でより精密に行った。

5.3 構造の異なるファイバー・バンドルを持つ SciFi 検出器の基本性能テスト

前節までに述べたテストで得られた結果により、マルチクラッド型ファイバーの 7 レイヤー構造で、所期の時間分解能が十分期待できることがわかった。その後、数種類のファイバーについて発光量の比較等のテストが行われ、COMPASS-SciFi トラッカーでの SCSF-78MJ ファイバーの使用が最終的に決定した。これらの結果に基づいて、1999 年までに COMPASS-SciFi 各ステーションの第一次的なデザインを行った。そこで、最終的な仕様を決定するためにより実際に近い仕様で試作機を製作し、1999 年に CERN-PS の T11 ビームラインにおいてテストを行った。

このテストのために、SCSF-78MJ ファイバーを使用して 7 レイヤーと 13 レイヤーのファイバー・バンドルを持つ試作機 H7、H13 を製作した。H13 は、特にビームホドスコープ・ステーションでより高い時間分解能が要求されることから、レイヤー数を増やすことでどの程度まで時間分解能を向上できるか調べる目的で製作した。また、長いライトガイドの影響を直接調べるために、7 レイヤーの H7 試作機に取り付け可能な延長ライトガイド・バンドルを製作した。これを H7 に取り付けた試作機を H7L とし、これを含めた計 3 種類の異なるファイバー・バンドルの構造を持つ試作機について、テストビームによる詳細な基本性能の評価を行い、それぞれの結果を比較した。本節では、このテスト実験の結果を詳しく述べる。

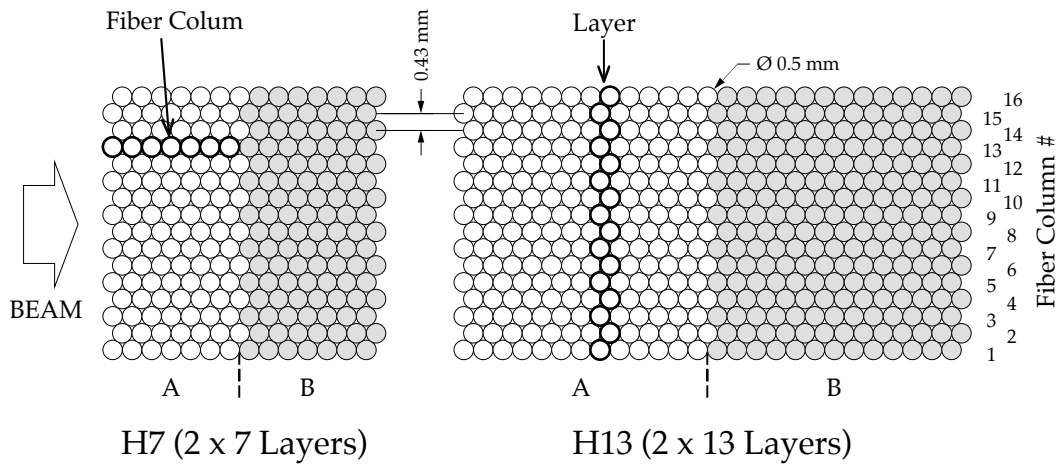


図 5.10: 2 種類のファイバー・バンドル H7 と H13 の SciFi アレイの構造。各バンドルは精密に積み重ねられた各 16 ファイバー・コラムの同等な検出器プレーン A、B を持つ。ファイバーは最密詰めで積み、コラム間ピッチは 0.43 mm になっている。

5.3.1 検出器の概要

この実験のために、2 種類の独立なファイバー・バンドル H7、H13 を製作した。各ファイバー・バンドルの違いは (1) 粒子の入射方向に積み上げたファイバーの本数、すなわちレイヤー数と、(2) SciFi にライトガイドとして接続したクリアファイバーの長さの 2 点である。

図 5.10 に各 SciFi アレイの断面図を示す。H7、H13 はともに精密に重ね合わされた二つの検出器プレーン A、B からなる。各プレーンは 16 個のファイバー・コラムから成る。SciFi はクラレの SCSF-78MJ の直径 0.5 mm を使用している。H7、H13 はそれぞれ 7 レイヤー、13 レイヤーの構造を持つ。各ピクセルはそれぞれ粒子の入射方向に一直線に並んだ 7 本、13 本の SciFi によって構成される。この試作機では、前節に紹介した試作機同様、細密詰めでファイバーを積み上げたため、コラム間のピッチは 0.43 mm となっている。

図 5.11 に、各検出器プレーンの概念図を示す。アレイ中の各 SciFi は長さ 5 cm でカットされ、同じ径のクリアファイバーにオプティカル・エポキシで接続されている。他方の端で、クリアファイバーはコラム毎にまとめられ、黒いプラスチックのディスクの穴に固定されている。このディスクは、ファイバー端を光電面ウィンドウに押し付けるのに使用される。ファイバー中で生成された光パルスはこのようにして PSPM 光電面の各ピクセルで読み出され、読み出し回路の各チャンネルで独立に読み出す。アレイの解放端にはオプティカル・エポキシでアルミ蒸着マイラーを接着し、反射板とした。

このテスト実験では、H7 に取り付け、取り外しができる長さ 3 m の独立な延長ライトガイド・バンドル (Light Guide Extender) を製作し、使用した。H7 の各プレーンに接続

5.3. 構造の異なるファイバー・バンドルを持つ SCIFI 検出器の基本性能テスト

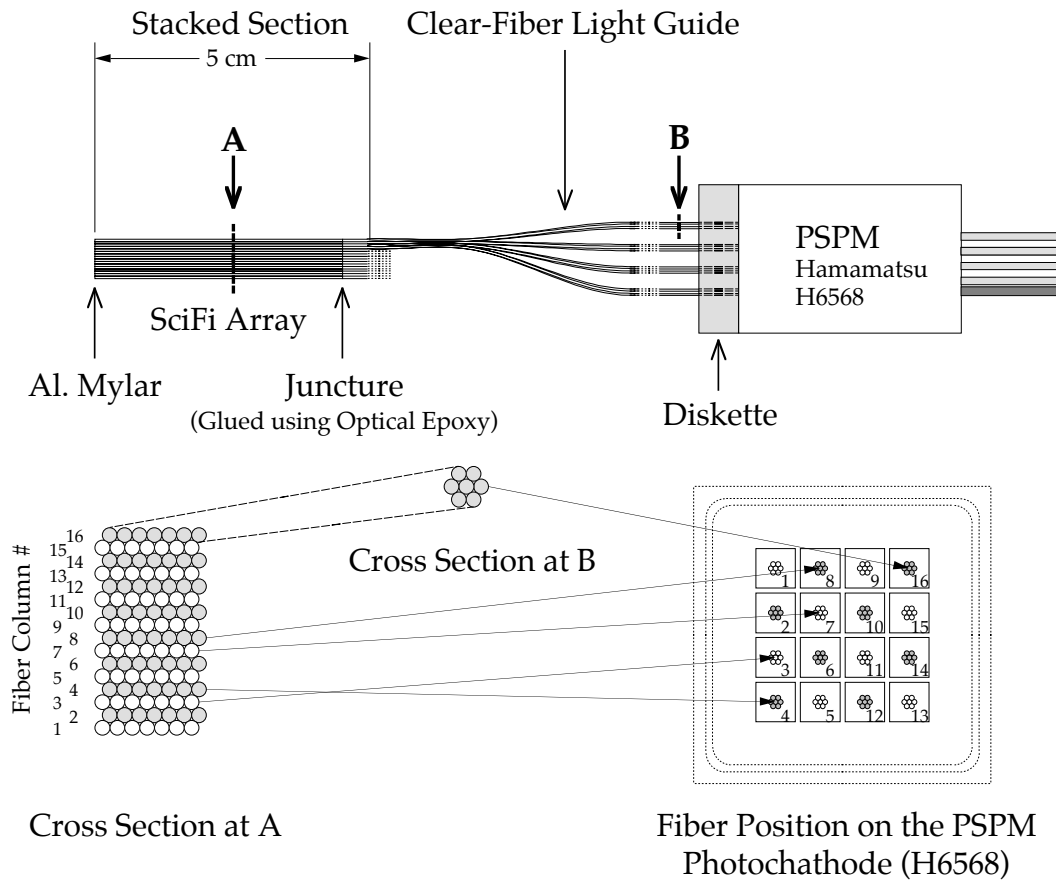


図 5.11: H7 試作機の単一プレーンの基本構成。SciFi アレイ部分の長さは約 5 cm あり、クリアファイバーは 50 cm である。

される各延長ライトガイド・バンドルは 16 本の直径 2.0 mm のクリアファイバー (クラレ Clear-PSM) で構成される。図 5.12 に示したように、各コラムのクリアファイバーはディスクケットに開けられた精密な穴により、エクステンダーの各ファイバーに接続される。機械的な安定性のため、上述したファイバー同士の接続にはオプティカル・グリース等は使用せず、空気接続とした。試作機の製作に先駆けて行われたベンチテストにおいて、ファイバー同士の接続での光損失を測定し、空気ギャップによる光伝達の損失はせいぜい 10% であることを確認している。この延長ライトガイドを H7 と PSPM の間に挿入した試作機を H7L と呼ぶ。

表 5.2 に、このテストで使用した 3 種類の試作機の仕様をまとめた。

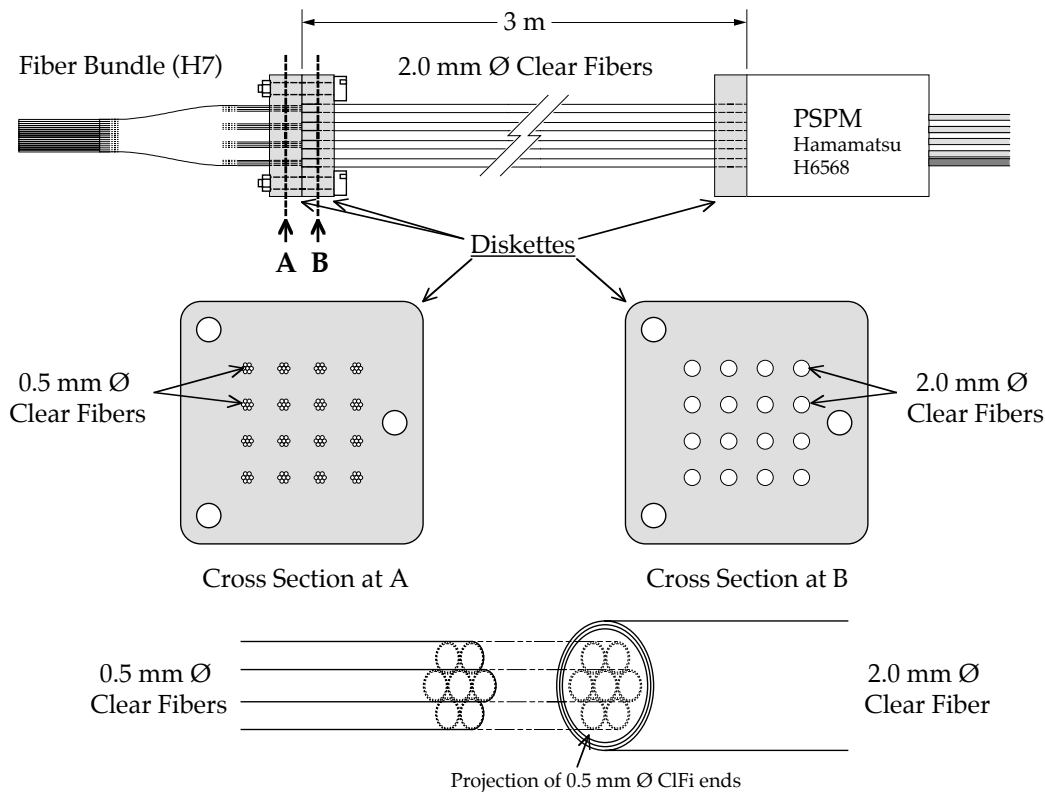


図 5.12: 延長ライトガイド・バンドルの概念図。延長ライトガイド・バンドルの両端には前出のディスクレット (Diskette) が取り付けられ、H7 バンドルと PSPM との接続部に挿入できる。ディスクレットの穴は正確に同じ位置に空けられており、H7 の各コラムの 7 本の 0.5 mm 径ファイバーは、最下段に示したように正確に一本の 2.0 mm 径クリアファイバー端面に接続される。

表 5.2: 3 種類の試作機 H7、H7L、H13 の基本仕様。各試作機について、ファイバー・バンドルのレイヤー数、SciFi の長さ、クリアファイバー (ClFi) の長さ、延長ライトガイド (LG extender) の長さを示した。

Detector	Fiber bundle				LG extender
	Description	# of layers per plane	SciFi length (0.5 mm ϕ)	ClFi length (0.5 mm ϕ)	ClFi length (2.0 mm ϕ)
H7	H7	7	5 cm	50 cm	—
H7L					300 cm
H13	H13	13	5 cm	25 cm	—

5.3.2 実験条件

ファイバー・バンドルの構造の異なる 3 種類の試作機、H7、H7L、H13 に PSC ディスクリミネーターを接続して、COMPASS の要求を満たす性能が得られるかどうかを調べるた

5.3. 構造の異なるファイバー・バンドルを持つ SCIFI 検出器の基本性能テスト

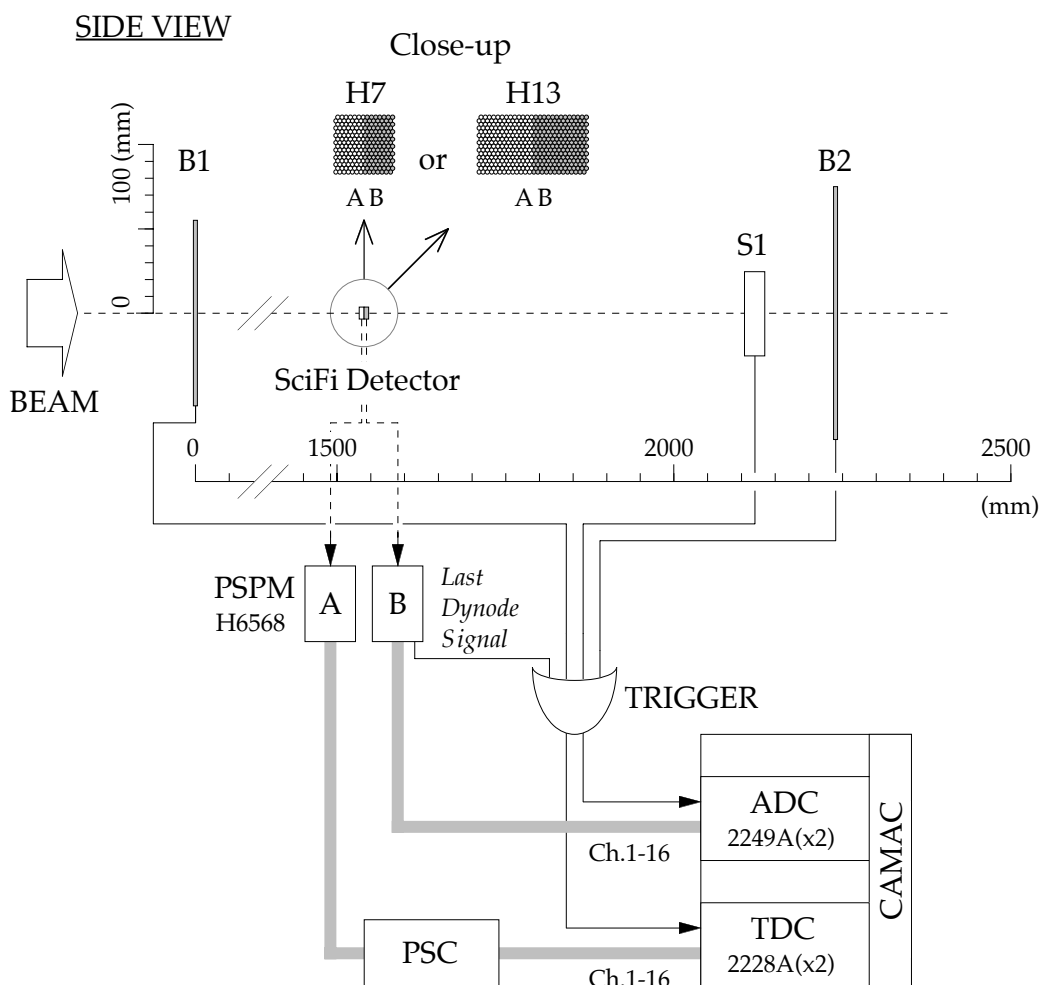


図 5.13: T11 ビームラインでのテスト実験のセットアップ。

めにテスト実験を行った。特に時間分解能の測定に重点をおき、位置分解能、検出効率、マルチプリシティ等の飛跡位置測定器としての基本性能を示すいくつかのパラメータを測定するために以下のようにテスト実験を計画した。実験では、SciFi 検出器に 3.6 GeV/c のハドロンビームを入射して各パラメータの測定を行った。

図 5.13 にテスト実験のセットアップ図を示す。SciFi 検出器は、3 種類の検出器を 1 台ずつ順次設置してテストした。

B1 と B2 は比較的大きなプラスチックシンチレーター板と 2 インチの光電子増倍管 (PMT) を使用したトリガーカウンターである。有感部分の形状はそれぞれ B1 が直径約 11 cm の円形、B2 が $15 \times 15 \text{ cm}^2$ の方形である。S1 は幅 1.5 cm、厚さ 3 cm、長さ 5 cm のフィンガーカウンターであり、ファイバーと直交する方向に設置した。

精密に重ね合わされた同等な検出器プレーン A、B は近接トラッキング (*proximity track-*

ing) のための位置情報を得るために使用される。例えば、プレーン A(B) の局所的な検出効率を測定するために、プレーン B(A) で飛跡の入射位置を決定する、という具合である。このとき、パラメータの測定を行うプレーンを"測定"プレーン、飛跡位置決定に使用するプレーンを"トラッキング"プレーンと呼ぶことにする。バックグラウンドを抑制して効率的な測定を行うため、トラッキングプレーンのラストダイノードの信号をトリガーに使用した。

大抵の測定において、飛跡位置決定には主に ADC のデータを使用した。トラッキングプレーンの PSPM の出力は外部のプリアンプを使用せず、長さ 30 m の同軸ケーブルを通して直接 ADC に接続した。ADC は LeCroy 社の 2249A を使用した。一方、測定プレーンの出力信号は PSC を通して TDC により読み出しを行った。PSC の出力信号は長さ 10 m のツイストペア・フラットケーブルを通して TDC に送られる。LeCroy 社の TDC、2228A の時間分割幅 (ビン) は 50 ps に設定した。時間分解能測定時には、プレーン A、B 共に PSC を通して TDC に接続した。両方のプレーンを貫通したイベントについて、各プレーンから得られた信号の時間差の分布を測定することにより、外部の検出器の時間情報を排除して SciFi 検出器の時間分解能だけを直接測定することができる。ADC を使用して信号波高分布を測定するときには、必要に応じて他方のプレーンを接続した TDC のデータを飛跡位置決定に使用した。

平均的なビームの計数率は 1.5 秒のスピルあたりで約 5×10^4 個、トリガーレートは約 3×10^3 カウントであった。

5.3.3 信号波高分布

ファイバー・コラムを粒子が貫通したイベントにおいて各ファイバー検出器の PSPM で生成される平均的な生成光電子数を評価するために、ADC を用いて信号波高分布の測定を行った。図 5.14 にそれぞれ (a)H7、(b)H7L、(c)H13 各検出器のプレーン A の第 8 チャンネルから得られた信号波高分布スペクトルを示す。横軸は ADC count であり、各ヒストグラムはペDESTALピークが 0 ADC counts になるように補正を行ってある。

前述したように、H7L は H7 のファイバー・バンドルと PSPM の間に長さ 3 m の延長ライトガイド・バンドルを装着したものであり、したがって (a) と (b) とは同一の PSPM チャンネルから得られた信号の波高分布である。PSPM への印加電圧はともに 900 V であり、両者のピークの位置から延長ライトガイド・バンドルを装着したときの信号の波高の変化を直接見ることができる。H13 には同型の別の PSPM を使用しており、高電圧は 850 V を印加している。

ここに示したすべてのヒストグラムに、SciFi 検出器に特有の信号波高分布の形状を見ることができる。すなわち、これらのヒストグラムは二つの主なピークを含んでいる。

5.3. 構造の異なるファイバー・バンドルを持つ SCIFI 検出器の基本性能テスト

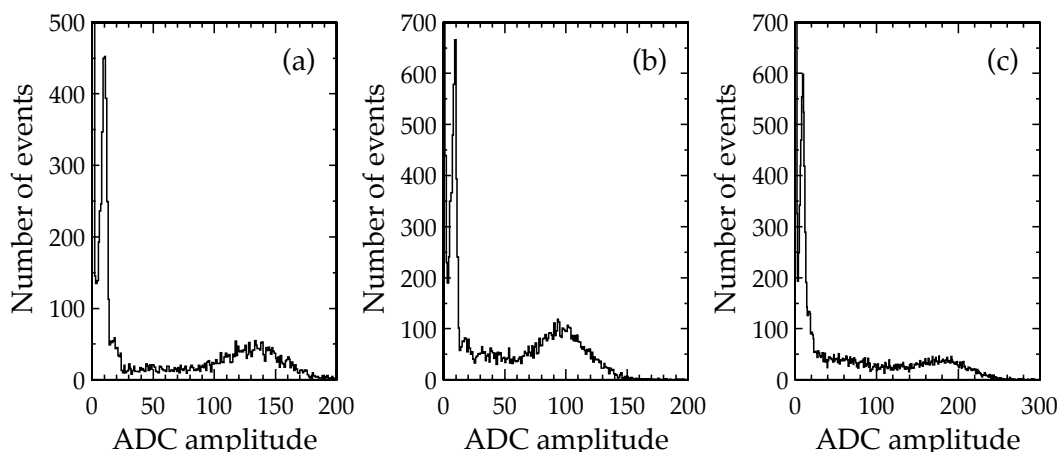


図 5.14: 3 種類の試作機 (a)H7、(b)H7L、(c)H13 のあるチャンネルで得られた信号波高分布スペクトル。

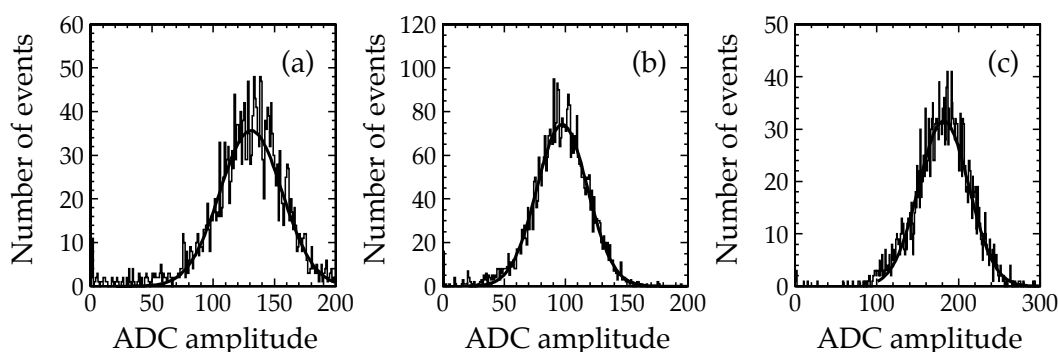


図 5.15: カットをかけて得られた 3 種類の試作機 ((a)H7、(b)H7L、(c)H13 のあるチャンネルの信号波高分布スペクトル。

各ヒストグラムで 10 ～ 15 ADC counts 付近に見られる単一光電子ピークは、主に測定チャンネル(8 ch)に隣接するチャンネル(7 ch、9 ch)で顕著な光パルスを生じたイベントによって生成されている。この事実は、次のようにして簡単に確認することができる。すなわち、最大の信号波高が検出されたチャンネルを粒子の入射チャンネルと仮定し、どちらかの隣接チャンネルを粒子が通過したイベントのみ取り除くと、ヒストグラムから単一光電子ピークはほぼ消滅する。このような飛跡位置決定法を *Maximum Amplitude Algorhythm* と呼ぶことにする。

このような小さな"光クロストーク"が生じる原因として、主に以下の二つが考えられる。一つは、傾きをもって入射した粒子が、隣接チャンネルと測定チャンネルのファイバーコラムを跨いで通過し、測定チャンネルのファイバーコラム中の数本のファイバーを掠めて

エネルギー損失のごく一部が検出される場合である。もう一つは、隣接ファイバーコラムを粒子が通過したイベントにおける、光の漏れこみである。付記するならば、PSPM の光電面上で生じるクロストークはこれらに比べ十分に小さく、無視できることが実験的に確認できる。

各ヒストグラムに見られる、もう一方の大きな波高を示す幅の広いピークは、ファイバーコラム中の全てのファイバーを貫通した粒子によって生成されるピークであると考えられる。このようなイベントによる"真の"ピークを抽出するために、重なり合ったプレーン B 上の対応するチャンネル (8 ch) の TDC のデータに飛跡が検出されたイベントのみでカットをかけた。図 5.15 に、このように選択したイベントから得られたスペクトルを示す。単一光電子ピークは完全に消滅し、スペクトルはほぼガウス分布の形状になっている。すべての試作機において、このピークは単一光電子ピークからよく分離していることがわかる。分布のスケールにおいて PSPM のリニアリティを仮定すれば、二つのピークを中心値の比から、ファイバーコラムを粒子が貫通したイベントにおける平均的な生成光電子数見積もることができる。この方法で、H7、H7L、H13 のそれぞれについて、全使用チャンネルの平均値として各 14 ± 2 個、 10 ± 1 個、 22 ± 2 個という値を得た。

H7 と H7L で得られた結果の比較から、3 m の延長ライトガイド・バンドル中での光の伝達損失は約 30% と見積もることができる。

5.3.4 検出効率とマルチプリシティ

PSC を使用したときの SciFi 検出器の時間分解能、位置分解能を正しく評価するためには、PSC の閾電圧と PSPM への印加電圧、もしくはその片方を調整し、現実的な使用条件でこれらのパラメータを測定する必要がある。このテスト実験においては、PSC の閾電圧は固定し、PSPM への印加電圧の調整を行った。この節ではこの調整の際に指標とした二つのパラメータ、検出効率とヒットマルチプリシティについて述べる。各パラメータの最適化については、5.3.7 節で再び詳しく議論する。

図 5.16 に、H7 のプレーン A、B を PSC と TDC に接続して得られた局所的な検出効率を、粒子の入射チャンネルに対してプロットした。粒子の入射チャンネルは、トラッキングプレーンに接続した ADC のデータを使用し、*Maximum Amplitude Algorythm* により決定したものである。各プレーンについて順次印加電圧の調整を行ったのちに測定を行った。

ここで、図に示した二種類の局所的な検出効率、すなわち、「1 対 1 検出効率」 $\epsilon_1(a) = n_1(a)/N(a)$ および「1 対 3 検出効率」 $\epsilon_3(a) = n_3(a)/N_3(a)$ を定義する。 $\epsilon_1(a)$ は、トラッキングにより入射チャンネルが a チャンネルに定義されたイベント数 ($N(a)$) に対し、実際に a チャンネルに飛跡の検出されたイベント数 $n_1(a)$ の割合であり、 $\epsilon_3(a)$ は、 a チャンネルと、隣接する 2 チャンネル ($a-1, a+1$) を含む 3 チャンネル中に 1 個以上の飛跡の検

5.3. 構造の異なるファイバー・バンドルを持つ SCIFI 検出器の基本性能テスト

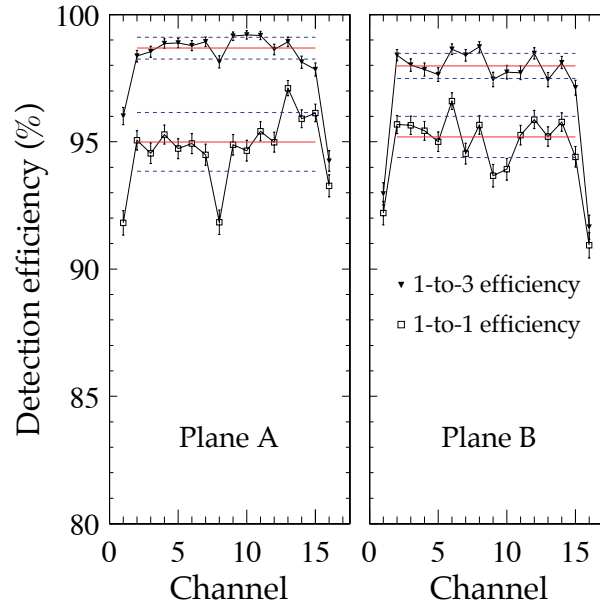


図 5.16: H7A、B プレーンの各入射チャンネルに対する検出効率。1 対 3 検出効率 (1-to-3 efficiency) と 1 対 1 検出効率 (1-to-1 efficiency)。各検出効率の定義については本文参照。

出されたイベント数 ($n_3(a)$) の割合である。入射チャンネルが両端のチャンネルである場合の 1 対 3 検出効率は隣接する片側のチャンネルのみを考慮し、2 チャンネル中に飛跡の検出されたイベントの割合とする。

図 5.16 に示した検出効率は、最適化した印加電圧 (プレーン A、B とともに 720 V) で測定したものである。両端のチャンネルを除いた 14 チャンネルの平均として、1 対 3 検出効率で 98 ~ 99% が得られている。図からわかる通り、1 対 3 検出効率に対し、1 対 1 検出効率は約 3 ~ 4% 低い値を示している。注意したいのは、偶然同時計数の影響は、この実験条件では十分に低く、無視できるということである。実際、イベントレート ($\gg 1$ kHz/ch) と TDC のダイナミックレンジ (200 ps) から単純に見積もると、その確率は 0.05% よりもずっと小さい。実際、1 対 5 以上で検出効率を見積もっても 1 対 3 のものと殆ど変化はない。すなわち、二つの検出効率の差は *Maximum Amplitude algorithm* による *proximity tracking* の精度を含め、この実験条件で実際に隣接チャンネルに飛跡が検出される割合を示していると考えられる。したがって、この 1 対 3 検出効率を、局所的検出効率の指標として採用することにする。

マルチプリシティ-"M" は検出器プレーン全体での 1 イベント (トリガー) あたりの検出飛跡数と定義する。私は、このマルチプリシティを SciFi 検出器にとって最も重要かつ有用なパラメータとして捉えている。マルチプリシティは検出効率の指標となるばかりでなく、クロストークやノイズによる偽の飛跡の発生確率の指標にもなる。実験から、SciFi

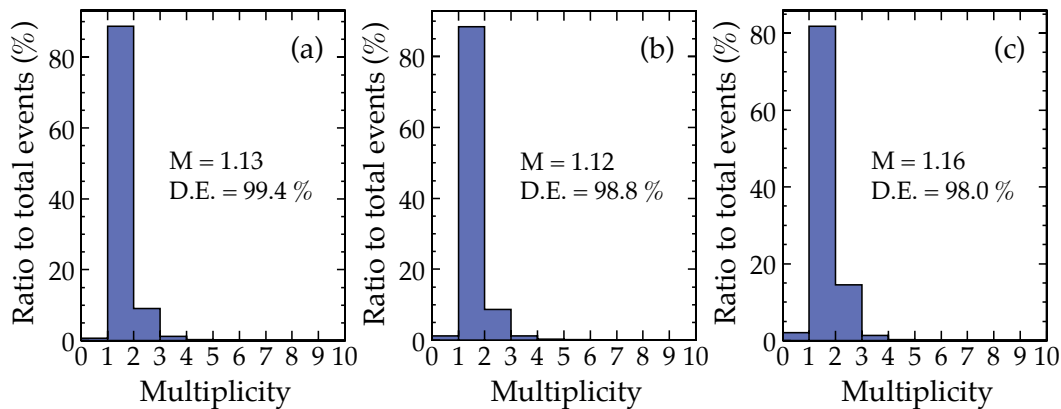


図 5.17: (a)H7、(b)H7L、(c)H13 の各プレーン A のヒットマルチプリシティ分布。図中に示した"M" は平均マルチプリシティ、"D.E."は $Multiplicity = 0$ のイベント数の割合から計算された全体検出効率 (Global Efficiency)。

検出器が高いマルチプリシティを示す場合、位置分解能及び飛跡の再構成率が低下することがわかっている。SciFi 検出器で効率的なトラッキングを行うためには、マルチプリシティを 1 に近付けることが非常に重要である。

基本的に、PSC の閾値に対して印加電圧を上げていくと、検出効率は高くなり、マルチプリシティも増加する。したがって、検出器の調整においては十分に高い検出効率と、低いマルチプリシティとを両立するような妥協点を見い出すことが要求される。このテスト実験においては、1 対 3 検出効率約 97.5%、マルチプリシティ M 約 1.1 を目安に印加電圧の調整を行った。

図 5.17 に、最適化した印加電圧で測定した各検出器のプレーン A のマルチプリシティ分布を示す。プレーン B に *Maximum Amplitude algorithm* を適用し、両端のチャンネルを除いたいずれかのチャンネルに飛跡位置が決定されたイベントを選択した。図 5.16 のプレーン A の検出効率と図 5.17(a) は同時に測定されたものである。

ここで、全体検出効率 (global detection efficiency) を、全イベント (トリガー) 数に対し、一つの検出器プレーン上のいずれかのチャンネルで最低一個の飛跡が検出されたイベント数の割合として定義すると、各マルチプリシティ分布から (a)99.4%、(b)98.8%、(c)98.0% という値を得る。1 対 3 検出効率の平均値との差は 1% 以下である。H7、H7L では検出効率、マルチプリシティ共にほぼ同様な値を得た。H13 では他に比べて高いマルチプリシティを示したが、これ以上印加電圧を下げると検出効率の低下を招くので、これを許容した。

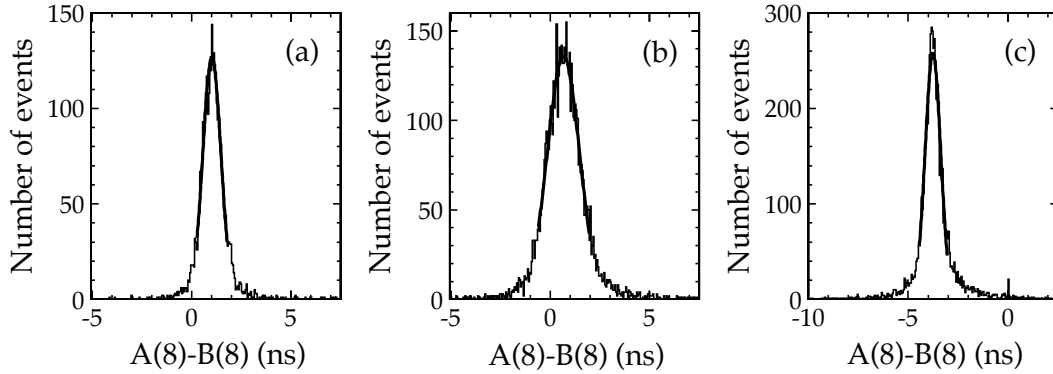


図 5.18: 各試作機のプレーン A、B の第 8 チャンネルから得られた信号の時間差分布。それぞれ (a)H7、(b)H7L、(c)H13 で測定したもの。

5.3.5 時間分解能

各 SciFi 検出器のプレーン A、B を共に PSC、更に TDC に接続し、時間分解能の測定を行った。PSPM への印加電圧は各検出器の各プレーンについて前述したように最適化した。

図 5.18 の各ヒストグラムは、プレーン A、B の各第 8 チャンネルで測定された、両方のプレーンを貫通した粒子の飛跡の時間差の分布である。これらの分布の幅の二乗は、各独立な検出器であるプレーン A、B の時間分解能の二乗和になっていると考えられる。したがって、この分布を $\sqrt{2}$ で除することにより、関係する二つのファイバーチャンネルの平均値としての時間分解能が計算できる。3 種類の検出器で使用全チャンネルについてこの値を計算し、これをチャンネル番号に対して図 5.19 にプロットした。全てのチャンネル対の平均値として、H7、H7L、H13 でそれぞれ時間分解能 (rms) 300 ps、540 ps、280 ps が得られた。

5.3.6 位置分解能

位置分解能を調べるために、プレーン A、B を粒子が貫通したイベントに対して *proximity tracking* を行った。プレーン A、B はそれぞれ ADC と TDC で読み出しを行っている。図 5.20 に H7 で測定された飛跡位置の相関図の例を示す。プレーン A 上の飛跡位置は *Maximum Amplitude algorythm* により決定した。ほぼ全てのイベントについて、プレーン A のあるチャンネルを通過した飛跡は、対応する (重なりあった) プレーン B 上のピクセルで検出されている。このことは、位置分解能が実質的にピクセルのサイズによって決定されることを示す。均一分布の公式から、これは位置分解能 $125 \mu\text{m}$ に相当する。

図 5.21 に、それぞれ (a)H7、(b)H7L、(c)H13 のプレーン B 上での飛跡分布図を示す。各

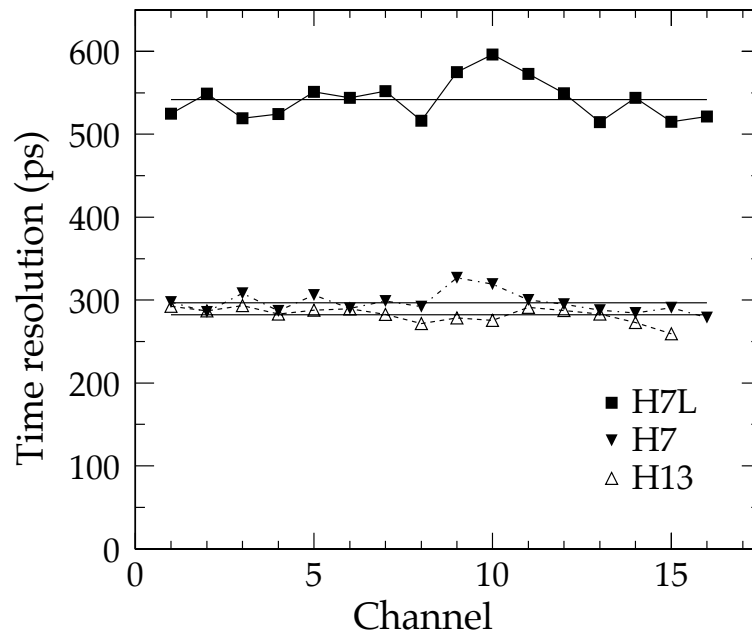


図 5.19: 3 種類の試作機の各チャンネルで得られた時間分解能の測定結果。

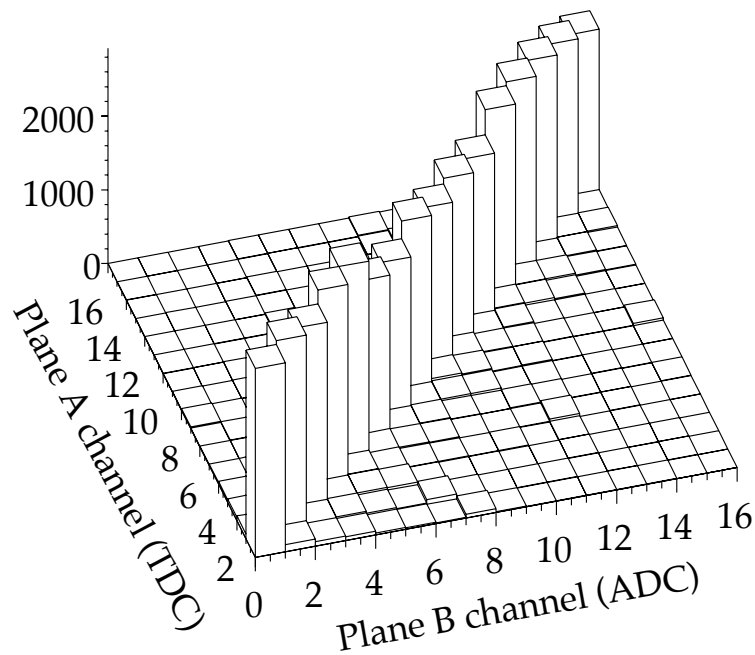


図 5.20: H7A、B プレーン上の飛跡検出位置の相関図。

検出器について、プレーン A に *Maximum Amplitude Algorithm* を適用し、飛跡位置が第 9 チャンネルに決定されたイベントのみを選択した。例えば、図 5.21(a) は図 5.20 の $X = 9$

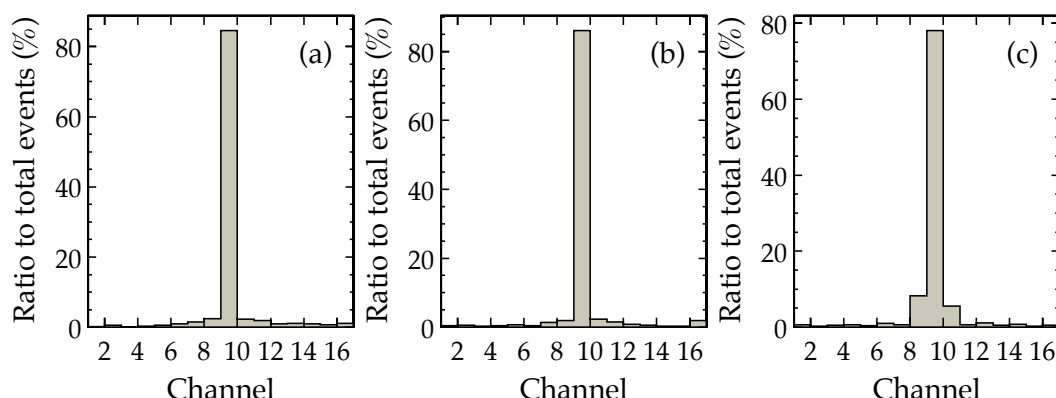


図 5.21: 第 8 チャンネルに粒子が入射したイベントのプレーン内の飛跡分布図。各 (a)H7、(b)H7L、(c)H13 のプレーン B で測定。

に対する Y 軸への射影に対応する。図からわかるように、H7、H7L では僅かに隣接チャンネルに飛跡が見られ、それ以外のチャンネルにはほぼ均一な、非常に低いバックグラウンドが分布している。H7、H7L については上述の位置分解能が得られていることがわかる。H13 では他に比較して約 5 倍のイベントが、隣接するチャンネルで検出されており、位置分解能は上記の値よりも悪いことを示している。

5.3.7 各パラメータの印加電圧依存性

PSC を使用した SciFi 検出器の最適な使用条件を調べるために、H7 用いて以下のような測定を行った。図 5.22 は、SciFi 検出器の性能を示す 3 種類のパラメータ、時間分解能、検出効率、マルチプリシティを、PSPM への印加電圧に対してプロットしたものである。時間分解能は全使用チャンネルの平均値であり、検出効率は、1 対 3 検出効率の両端のチャンネルを除いた全使用チャンネルの平均値である。この測定において、PSC の閾電圧は印加電圧によらず一定に保った。3 種類のパラメータは各印加電圧において同時に測定された。このとき、プレーン A、B 共に PSC を通して TDC に接続し、すべてのパラメータはプレーン A で測定し、測定に必要なトラッキングには TDC で測定したプレーン B のデータを使用した。

図に明確に見て取れるように、閾電圧を固定して印加電圧を上げていくと、時間分解能、検出効率はともに向上し、マルチプリシティが増加する。検出効率は印加電圧 720 V 付近でプラトーに達している。同時に、マルチプリシティの増加が顕著になっているのがわかる。これは、信号波高分布に見られた単一光電子による信号が閾電圧を超えて検出されるようになるためであると考えられる。このような信号は主にクロストーク、ノイズに

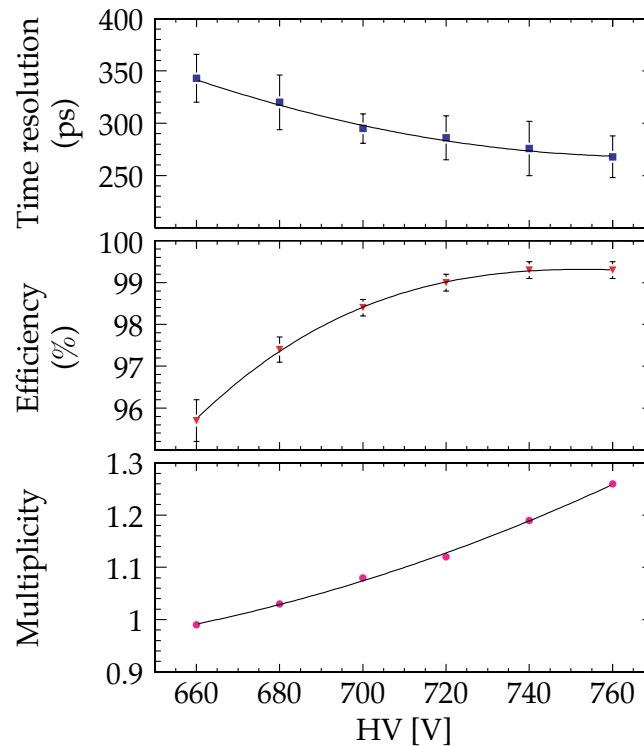


図 5.22: 検出器の基本性能を示す各パラメータの印加電圧依存性の測定結果。上から時間分解能、検出効率、マルチプリシティ。

よって生成されており、こうした信号の検出は位置分解能を低下させ、飛跡位置測定器として使用したときに飛跡の再構成率を低下させることにもなり得る。したがって閾電圧は、単一光電子ピークが完全に排除される最低のレベルに設定するのが最適であると考えられる。これは、このプロットでは印加電圧の値で 700 V ~ 720 V 程度に相当し、検出効率およびマルチプリシティの値でそれぞれ 98.5%、約 1.1 程度が最適な値となる。

次に、同様の測定を、今度は各測定点において PSC の閾電圧を調整しながら行った。閾電圧は、検出効率が約 97.5% になるように調整した。その結果、測定を行った 580 V ~ 800 V の印加電圧の広い範囲においてほぼ一定の時間分解能およびマルチプリシティを得た。この結果は、この試作機では PSC の閾電圧の調整のみで、PSPM への印加電圧によらず安定に高い性能が得られることを意味する。すなわち、この SciFi 検出器は比較的低い印加電圧で使用することが可能である。印加電圧を低く抑えることは、特に COMPASS のような高計数率環境においては、PSPM 内の空間電流の増大を抑制して増幅率の低下を防ぎ、リニアリティを改善するといった利点をもたらす。これにより、高計数率でも安定に運転が可能であることが期待される。

5.3. 構造の異なるファイバー・バンドルを持つ SCIFI 検出器の基本性能テスト

表 5.3: 3 種類の試作機で得られた時間分解能と生成光電子数の測定結果。

	# of photo-electrons	Time resolution σ [psec]	Description
a) H7	14	300	7-layers with 50 cm long 0.5 mm ϕ clear fibers
b) H13	22	280	13-layers with 25 cm long 0.5 mm ϕ clear fibers
c) H7L	10	540	H7 + 3 m long 2.0 mm ϕ clear fibers

5.3.8 まとめと考察

表 5.3 に、3 種類の試作機 H7、H7L、H13 で得られた時間分解能と生成光電子数の測定結果をまとめた。

H7、H13 で得られたそれぞれ ~ 300 ps (rms)、 ~ 280 ps (rms) の時間分解能は同様の位置分解能を持つ飛跡測定器としてはこれまでにない高い時間分解能であり、COMPASS の要求を十分に満たす。この 2 つの試作機では、生成光電子数では大きな差が得られているが、時間分解能の違いは 10% 以下と予想に反して小さかった。この結果は同等の飛跡位置決定性能を要求した条件で得られたものである。H13 ではコラムに含まれるファイバー数が多く、わずかな傾きを持って粒子が入射した場合でも隣接する 2 コラムを通過する割合が増えるため、マルチプリシティ、位置決定精度が低下する。実際の検出器製作の観点からすれば、レイヤー数が少ない方が、信頼性の高い検出器の製作を容易に行うことができる。したがって、時間分解能に大きな違いが見られなかったので 7 レイヤー構造のほうが SciFi トラッカーの構造に適していると言える。

長さ 3 m のライトガイドを付加した H7L では、540 ps (rms) の時間分解能を得た。この値は短いライトガイドの場合に比べて顕著に低下しているが、長いライトガイドの使用が避けられない条件を考えれば、COMPASS-SciFi トラッカーとして使用可能な時間分解能であると言える。このテストで、長いライトガイド中での光の減衰と広がりによって時間分解能に大きな影響が出ることがわかった。この結果は、特に高い時間分解能を必要とする SciFi トラッカーを建設する場合、ライトガイドの長さをできる限り短くすることが非常に重要であることを意味している。

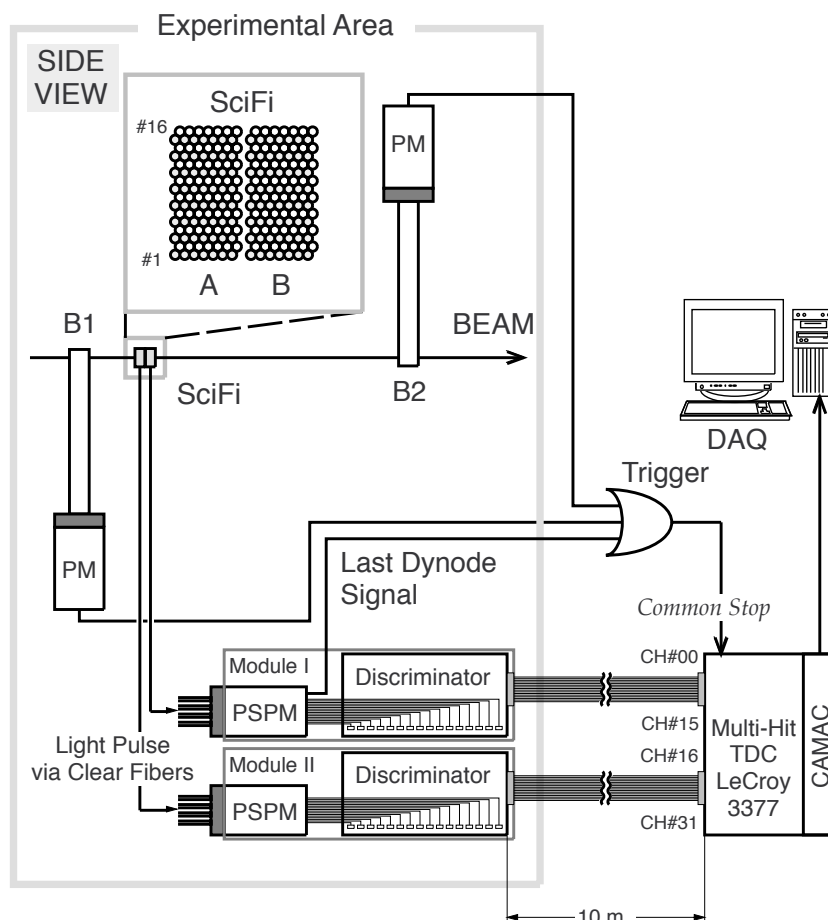


図 5.23: M2 ビームラインでのテスト実験のセットアップ

5.4 高計数率環境での性能評価

前の 5.3 節で述べたテスト実験において、比較的低い計数率では H7、H13 試作機で所期の性能を得た。そこで次に、COMPASS のような非常に計数率の高い使用条件での SciFi トラッカーの性能を評価するため、実際に COMPASS 実験の行われる CERN-SPS の M2 ビームラインにおいて、190 GeV/c のミュオンビームを使用してテスト実験を行った。

5.4.1 実験条件

図 5.23 に、テスト実験の基本的なセットアップ図を示す。このテストでは 5.3 節で述べた H7 に、ブースターケーブルを装備した PSPM と、COMPASS 用に新たに開発した PSC の試作機を接続して使用した。このときの M2 ビームラインにおける $190 \text{ GeV}/c$ でのビー

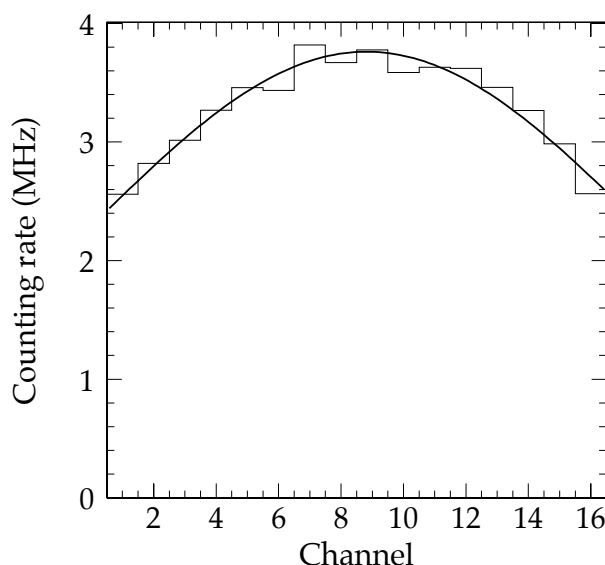


図 5.24: H7B プレーン上の高強度ミュオンビームのビームプロファイル (ビーム強度 $\sim 1.4 \times 10^8$ muons/spill)。

ム強度は最大で 1.4×10^8 muons/spill であった。これは COMPASS で予定されるビーム強度の 70% 程度であるが、ビームの焦点付近に検出器を設置したため、SciFi 検出器のチャンネルあたり、PSPM あたりの計数率は COMPASS で予想される値よりもかなり高い。

このテストのために、前節で述べた 13 レイヤーの試作機 H13 のプレーン A、B を分離し、独立なホドスコープを製作してトリガーカウンター B1、B2 として使用した。B1、B2 は H7 のファイバーの向きと直交する方向に設置した。トリガーレートを低く抑えるために、ビーム粒子は各プレーンの単一ファイバーコラムのみによって決定した。典型的な計数率は 10^5 events/spill であった。

このテストでは、H7、H13 に使用した 4 本の PSPM 全てにブースター電源を使用した。ここでは外部にブースター回路は使用せず、最終 4 段の各ダイノードに直接 HV 電源の独立なチャンネルを接続して適当な電圧を供給した。

本節で示す結果の大部分は、A、B 各プレーンを共に PSC、続いて TDC に接続し、TDC のデータを用いた近接トラッキングにより得られたものである。高計数率に対応するために、TDC は LeCroy のマルチヒット TDC (3377) を使用した。TDC ビンは 500 ps に相当し、SciFi の時間分解能 (~ 400 ps) を正確に評価することは難しい。このため時間分解能のみ、TDC ビン ~ 100 ps の F1-TDC の試作機を用いて後に再度測定した。

高いビーム強度、すなわち高い計数率による SciFi 検出器の性能に対する影響を直接調べるため、基本的に各パラメータは他の条件を固定し、高ビーム強度 ($\sim 1.4 \times 10^8$ muons/spill)、低ビーム強度 ($\sim 1 \times 10^7$ muons/spill) において 2 回ずつ測定を行った。

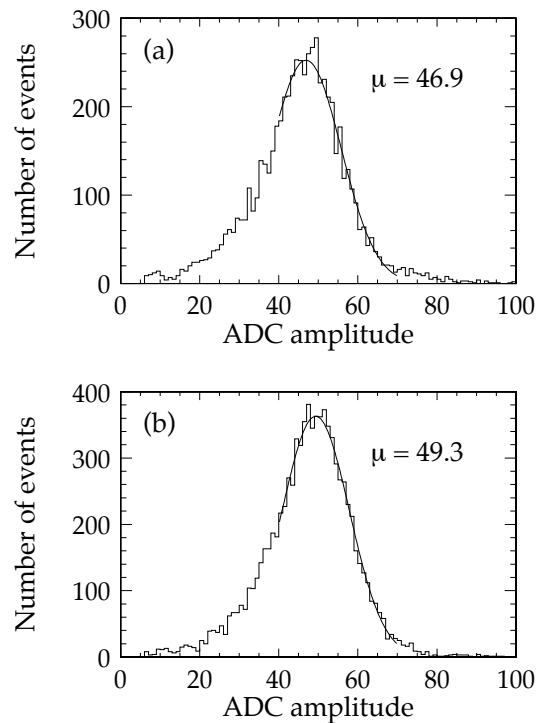


図 5.25: H7 のプレーン A 第 8 チャンネルから得られた ADC スペクトル。トラッキングプレーン (B) を使用してイベント選択を行った。ビーム強度 (a) 1.4×10^8 muons/spill、(b) 1×10^7 muons/spill にて測定。

図 5.24 に、H7B プレーン上の高強度ミュオンビームのビームプロファイルを示す。各チャンネルの計数率は、トリガー毎の TDC スケール中の平均イベント数から見積もった。測定はランダムトリガーにより行った。単一チャンネルでの計数率は、中心のチャンネルで最も高く約 4 MHz 程度であった。このように、H7 のファイバー・アレイはビーム中心に正確に設置した。チャンネルあたりの計数率は全チャンネルの平均で約 3 MHz であり、プレーン全体、すなわち PSPM あたりの計数率は約 50 MHz であった。

5.4.2 信号波高分布

PSPM 出力の信号波高分布は、SciFi 検出器の性能を示す最も基本的で有用なパラメータである。高計数率での出力信号波高の安定性を調べるために、一方のプレーン (A) の PSPM のアノード各チャンネルの出力を同軸ケーブルを通して直接 CAMAC の ADC (LeCroy 2249A) に接続し、信号波高分布の測定を行った。図 5.25 は、ビーム強度 (a) 1.4×10^8 muons/spill と (b) 1×10^7 muons/spill で得られた、プレーン A のアノード第 8 チャンネルの ADC スペクトルである。高ビーム強度の条件ではチャンネルあたりの計数率は約 4 MHz であり、ADC

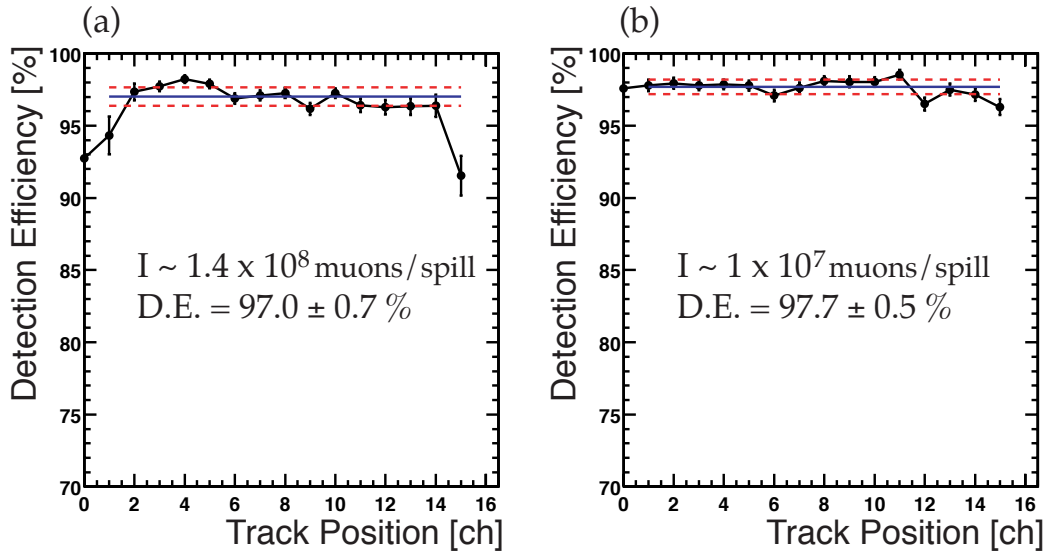


図 5.26: H7A プレーンの粒子の入射位置に対する 1 対 3 検出効率。横軸はトラッキング・プレーン (B) で決定した粒子の入射チャンネル。ビーム強度 (a) 1.4×10^8 muons/spill、(b) 1×10^7 muons/spill にて測定。

のゲート (25 ns) 内に 2 粒子が同時に入射する確率は 10% である。したがって、単一入射粒子によるスペクトルを得るために、トラッキング・プレーン (B) の TDC データを用いてイベントを選択した。すなわち、ADC のゲートに対応する 25 ns のタイムウィンドウによるカットを行い、プレーン B 上で第 8 チャンネルに一個だけヒットがあったイベントのみを抽出した。それでもなお、PSC の連続 2 信号分解能 (Double Pulse Resolution) 約 15 ns を考慮すると、約 6% 程度のパイルアップが生じ得る。図 5.25(a) にわずかに見られる高波高のテールはこの影響を示していると考えられる。しかし、この影響は小さいと考えられ、スペクトルの形状、中心値ともに、各計数率でほぼ安定であることがわかる。

5.4.3 検出効率とマルチプリシティ

第 5.3.4 節に述べたように、時間分解能、位置分解能の測定を行う前に、H7 の A、B 各プレーン共に検出効率とマルチプリシティの適正な値が得られるように、チューニングを行っておくことが重要である。このテストでは、COMPASS 用に新たに開発した PSC 試作機を使用した。この PSC 試作機は 4.5 節で述べたように RS485 プロトコルを使用した PC からのリモートコントロールにより、各チャンネルの閾電圧を独立に調整することができる。このテストでは PSPM の印加電圧は 700 V に固定し、PSC 各チャンネルの閾電圧を調整して、チューニングを行った。計数率が高い場合、偶然同時に複数の粒子が検出器

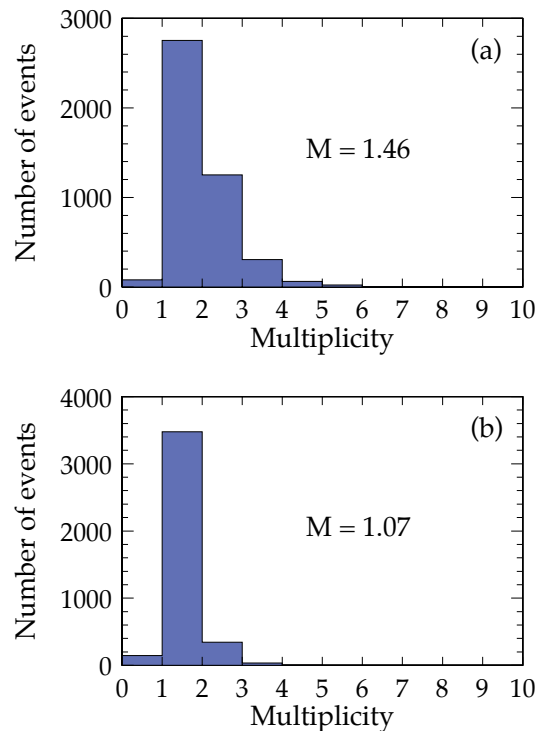


図 5.27: H7A プレーンのヒットマルチプリシティ分布。トラッキング・プレーン (B) に一個以上ヒットがあったイベントについてプロットした。ビーム強度 (a) 1.4×10^8 muons/spill、(b) 1×10^7 muons/spill にて測定。

を通過する確率が高くなり、マルチプリシティを正しく評価できない可能性がある。そこで、チューニングはこの確率が十分に低いと考えられる低ビーム強度の条件で行った。ここで与えたチューニングの条件は、平均 1 対 3 検出効率を 97.5% 以上、マルチプリシティを 1.2 以下とした。

高計数率での検出効率の安定性を調べるために、低ビーム強度で調整した PSC の閾電圧を固定し、同じ条件で高ビーム強度でも検出効率の測定を行った。それぞれ (a) 高ビーム強度 1.4×10^8 muons/spill と (b) 低ビーム強度 1×10^7 muons/spill で測定した 1 対 3 検出効率を図 5.26 に示す。両端では図 5.16 と同様に、他のチャンネルに比較して検出効率がやや低くなっている。さらに (a) では第 2 チャンネルの検出効率もやや低い、後で示す図 5.31 に見られるように、高ビーム強度の測定ではトリガーカウンター H13A、H13B の重なり部分を小さくしたため、両端の数チャンネルはこの重なりから外れているためであると考えられる。この 3 チャンネルを除いた 13 チャンネルの平均では、高ビーム強度の場合でも検出効率は 97% 以上あり、顕著な低下は見られないことがわかる。

図 5.27 に、同様に各ビーム強度で測定したヒットマルチプリシティ分布を示す。ここでは特に高ビーム強度の条件で、偶然同時計数によるマルチプリシティの変化を見るた

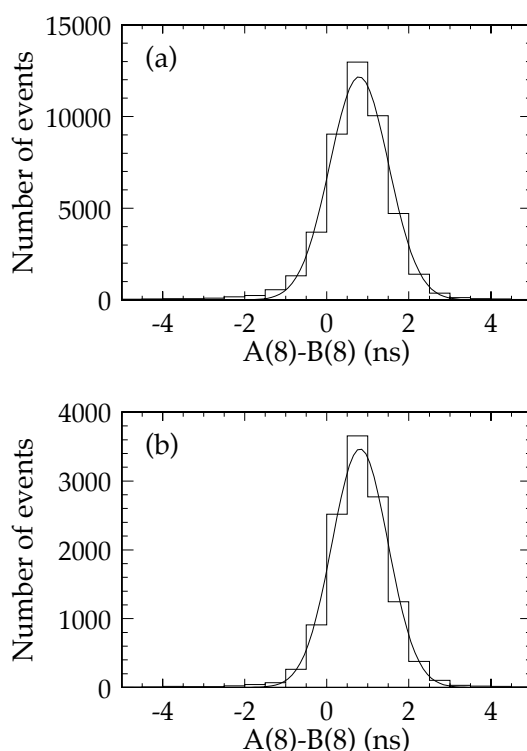


図 5.28: H7A、B プレーンの各第 8 チャンネルで検出された信号の時間差の分布。ビーム強度 (a) 1.4×10^8 muons/spill、(b) 1×10^7 muons/spill にて測定。

めに、トラッキングプレーンでは単一飛跡イベントを選択せず、一個以上のヒットが記録されたイベントについて、マルチプリシティ分布をプロットした。カットの条件は、時間幅で約 10 ns とした。低ビーム強度の場合、マルチプリシティは 1 に近い値が得られている。単一ヒットの比率は 90% 以上である。一方で、高ビーム強度では単一ヒットの割合は 60% 程度にまで低下する。

マルチプリシティ分布から得られる全体検出効率、高ビーム強度の方が高くなっている。これは偶然同時計数の影響によっており、検出効率を見積もるために、特に高計数率環境においては飛跡位置でカットをかけ、局所的な検出効率を測定するのが重要であることがわかる。また、タイムウィンドウの幅を狭くすることが本質的に重要であることが、明確に見てとれる。

5.4.4 時間分解能

プレーン A、B を共にマルチヒット TDC (LeCroy 3377) に接続し、各ビーム強度での SciFi 検出器の時間分解能を測定した。図 5.28 に、A、B 各プレーンの第 8 チャンネルを

粒子が通過したイベントについて、二つのチャンネルで検出された信号の時間差の分布の例を示す。それぞれ、(a) 高ビーム強度、(b) 低ビーム強度、で測定を行った。他のチャンネルについても同様の測定を行い、得られた分布の幅 (rms) は、全 16 チャンネルの平均値として、高ビーム強度、低ビーム強度でそれぞれ 690 ps、650 ps であった。

ここで使用した TDC (3377) の時間分解能 $\sigma_{TDC} \sim 300$ ps[80]、TDC の分割幅 (ビン) の寄与 $\sigma_{bin} = 500 \text{ ps} / \sqrt{12} \sim 140$ ps は SciFi 検出器の時間分解能に比べて無視できない。SciFi 検出器自身の時間分解能 σ_i は各プレーンで一様とすれば、測定で得られた分布の幅を σ_m として次式で表される。

$$\sigma_m^2 = 2\sigma_i^2 + 2\sigma_{TDC}^2 + 2\sigma_{bin}^2 \quad (5.2)$$

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{\sigma_m^2 - (2\sigma_{TDC}^2 + 2\sigma_{bin}^2)}}{\sqrt{2}} \quad (5.3)$$

この式からは、高ビーム強度で $\sigma_i = 360$ ps、低ビーム強度で $\sigma_i = 320$ ps (rms) を得る。この結果から時間分解能を精密に測定することは難しいが、高ビーム強度の条件でも時間分解能は 400 ps より高く、ビーム強度の違いによる変化はせいぜい 10% 程度であり大きな影響はない、と見積もられる。

この見積もりは、後に F1-TDC の試作機を使用して行った別の測定の結果と一致したことによって確認することができた。

この測定は、高ビーム強度の条件 (1.4×10^8 muons/spill) において H7 をビームスポット中に設置し、上とほぼ同様のセットアップで行った。この測定では、F1-TDC に接続するため出力の LVDS 変換を搭載した新型の PSC 試作機を使用した。16 入力チャンネルを持つ F1-TDC の試作機を使用して上と同様の測定を行うために、H7A、B 各プレーンの第 1 から第 8 チャンネルまでを PSC に接続し、続いて F1-TDC に接続した。

図 5.29 に、H7A、B の第 8 チャンネルで得られた時間差分布を示す。このとき F1-TDC の時間分割幅は約 100 ps であった。この場合 TDC の時間分解能等の寄与は十分小さいと考えられるので、分布の幅を $\sqrt{2}$ で割ったものを時間分解能であると仮定する。図 5.30 に 8 対のチャンネルについて、こうして得られた時間分解能をプロットした。この結果から、8 チャンネルの平均値として時間分解能 370 ps (rms) が得られた。これにより、前の測定での見積もりが正しいことが確認された。

5.4.5 位置分解能

H7A、B プレーンの近接トラッキングを用い、プレーン B 上で 1 個だけ飛跡が検出されたイベントのみを選択して位置分解能の測定を行った。関連のあるイベントを抽出するために、A、B 各プレーンに同期した 10 ns 幅のタイムカットをかけた。図 5.31 は、ビーム強度 1.4×10^8 muons/spill で得られた H7A、B プレーンの飛跡検出チャンネルの相関を、

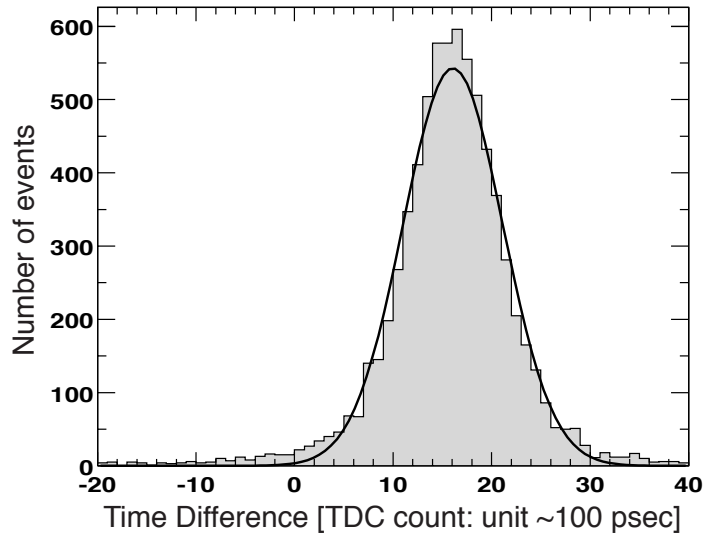


図 5.29: H7A、B プレーンの各第 8 チャンネルで検出された信号の時間差の分布。ビーム強度 1.4×10^8 muons/spill にて測定。

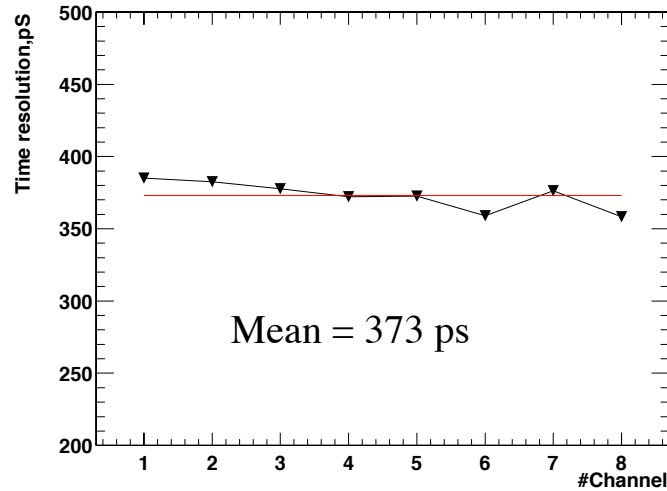


図 5.30: F1-TDC による高計数率での各チャンネルの時間分解能。

イベントごとにプロットしたものである。バックグラウンドのレベルはこのような高ビーム強度の条件でも非常に低く、明確な 1 対 1 相関が見られる。これにより、マルチプリシティがほぼ 1 に近いことも確認できる。位置分解能は、5.3.6 節で示した低いビーム強度での測定結果と同様に約 $125 \mu\text{m}$ であり、飛跡位置決定性能が計数率によらず安定であることが示された。

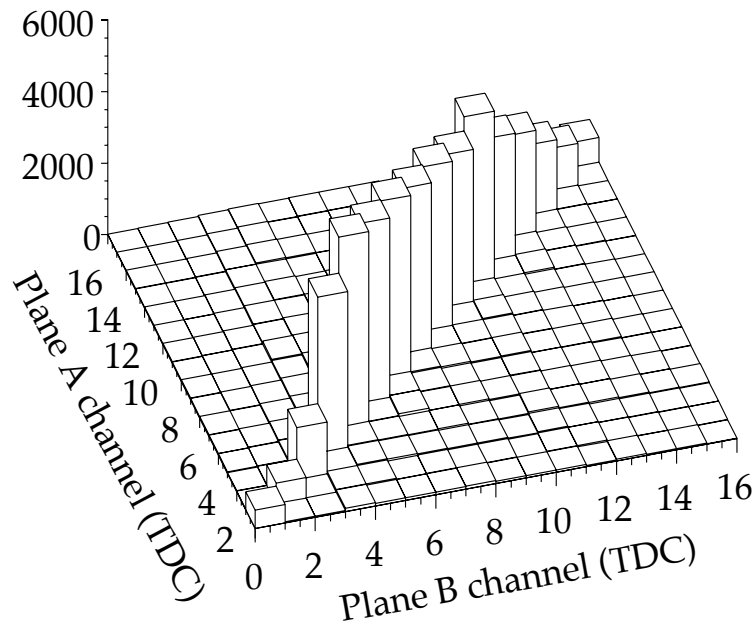


図 5.31: H7A、B プレーン上の飛跡位置の相関プロット。ビーム強度 1.4×10^8 muons/spill にて測定。

5.4.6 まとめ

測定を行った (a) 高ビーム強度 1.4×10^8 muons/spill、(b) 低ビーム強度 1×10^7 muons/spill の 2 種類のビーム強度において、信号波高分布、検出効率、時間分解能、位置分解能等の SciFi トラッカーの基本性能に顕著な変化は見られず、97%以上の検出効率で COMPASS の要求を満たす時間分解能 400 ps 以下、位置分解能約 $125 \mu\text{m}$ という高い性能が得られた。

高ビーム強度の条件で得られた PSPM チャンネルあたりで最大 4 MHz、PSPM 全体で約 50 MHz という高計数率は、COMPASS-SciFi で予想される計数率の約 2 倍という非常に高い計数率である。信号波高分布の測定結果は、最終 4 段のダイノードにブースターを使用することでこのような高計数率でも PSPM の出力が安定していることを示しており、したがって、SciFi トラッカーの諸性能も計数率によらず安定である。

これまでに 1.4×10^8 muons/spill という高強度ビームを直接入射してこのような高い性能が得られた検出器の例はなく、この結果は高計数率型の飛跡測定器開発において、特筆すべきものである。

このテストではじめて、COMPASS の実際の使用条件においても目標とする時間分解能等、所期の性能が得られることを確認し、COMPASS 実験用 SciFi トラッカーに要求されるすべての条件をクリアした。これにより、開発研究の目標はすべて達成し、この試作機の仕様による実機の建設が決定された。

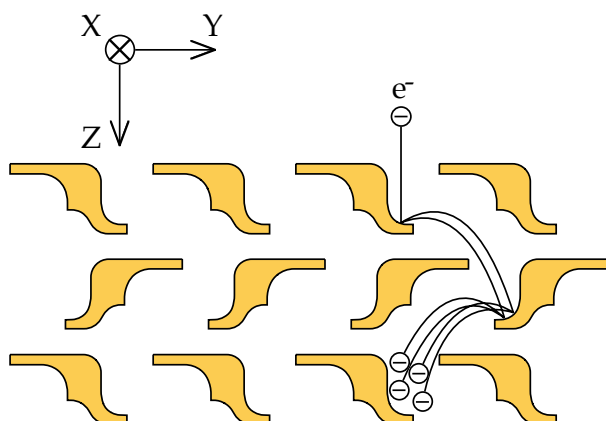


図 5.32: H6568 のメタルチャンネル・ダイノードの構造及び座標系。

5.5 H6568 の出力の磁場依存性と磁気シールドのテスト

前の節 4.2.2 で述べたように、COMPASS-SciFi トラッカーのターゲット・ステーション (SF3、SF4) は、偏極標的用ソレノイド電磁石と、スペクトロメーター電磁石 SM1 の比較的強い漏れ磁場の中で使用しなければならない。このため、簡単で且つ信頼性の高い PSPM の磁気シールドの設計を行うため、様々な形態の磁気シールドを用いて、外部磁場に対する PSPM (Hamamatsu H6568) の出力変化を調べた。

この測定は、実験室の小型のヘルムホルツ型ソレノイド電磁石を用いて行った。この磁石で得られる磁場は、最大電流約 10 A に対し、400 G¹であった。磁場の方向による PSPM の出力への影響の違いを見るため、PSPM はソレノイドのボア中で、3 通りの異なる方向に向けられる。以下で、各測定における磁場の方向 (X、Y、Z) は PSPM のダイノードの構造に対して、図 5.32 に示す座標系により定義する。各測定において、ヒステリシスの効果を見るために、磁場のスキャンは次のようなサイクルで行った。すなわち、0 G → +400 G → 0 G → -400 G → 0 G のように磁場を変化させながら、測定を行った。各測定において、ラストダイノード信号と、PSPM の中心部にあるアノード第 10 チャンネルの信号を同時に測定した。測定は、デジタル・オシロスコープを用いて信号波高を読み取った。

このテストでは、光源として赤色 LED を、パルスジェネレーターにより短いパルス状に点滅させて使用した。各パルスの光量は、照射された光電面全体で得られる光電子数にして 50 個程度であった。

磁気シールドを使用しない場合の、PSPM の軸方向 (Z)、横方向 (X、Y) の外部磁場に対する PSPM の磁場耐性の測定結果を、図 5.33 に示す。各方向の結果について、ラストダイノード信号波高 (三角)、アノード信号波高 (丸) の測定結果をともにプロットした。ヒ

¹Gauss, 400 G = 40 mT

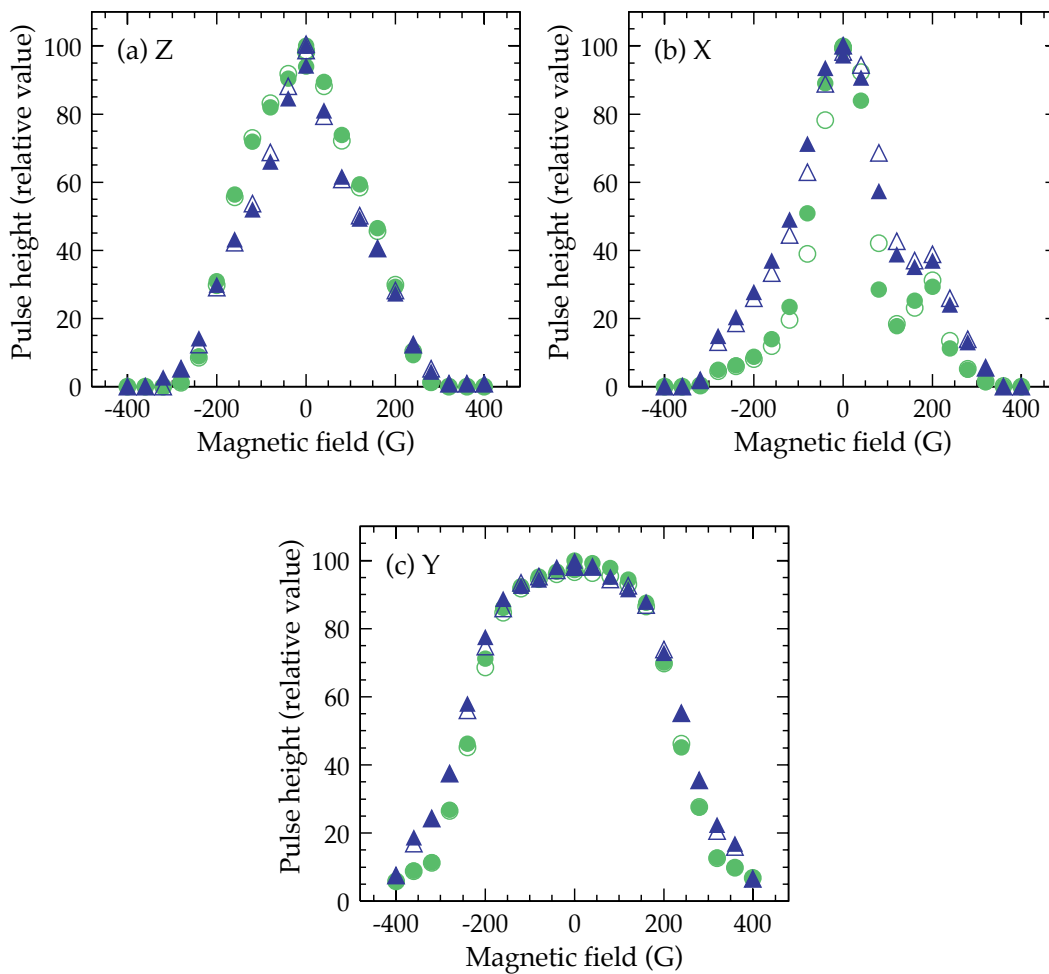


図 5.33: (a)Z、(b)X、(c)Y 方向の外部磁場に対する出力信号波高の変化。ラストダイノード(三角)及びアノードチャンネル 10(丸)

ステリシスの効果を明確にするために、磁場スキャンが正方向(負から正)に変化しているときの測定結果には塗り潰したマーカーを使用し、磁場スキャンが負方向(正から負に変化)に変化しているときの測定結果には白抜きしたマーカーを使用している。信号波高は、各磁場スキャンの開始点(磁場 0 G)での信号波高を 100 とした相対値で示した。

各図から、すべての方向の磁場変化に対して、ラストダイノード信号とアノード信号の変化はほぼ似通っていることがわかる。

この測定の結果から、このタイプの PSPM(H6568) が比較的弱い磁場に対しては非常に高い磁場耐性を示すことがわかる。全ての磁場方向に対し、50 G 程度までは信号波高の低下は 20% よりも小さい。特に、Y 方向の外部磁場に対して顕著に高い磁場耐性が見ら

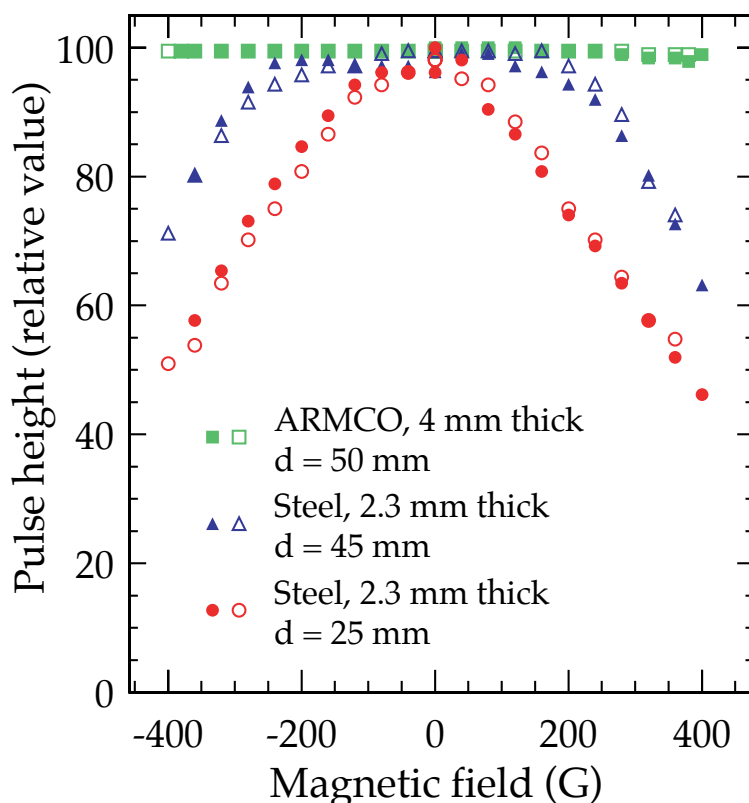


図 5.34: 角柱型鉄製磁気シールドを用いた場合のラストダイノード出力信号波高の軸方向磁場 (Z) に対する変化。

れる。この方向では、約 120 G 程度の外部磁場を与えても、信号波高の低下は 10% 以下である。

次に、同様の条件で磁気シールドの効果を調べた。はじめに、厚さ 2.3 mm で寸法が $40 \times 40 \times 100 \text{ mm}^3$ のスチール製の角形チューブを磁気シールドとしてテストした。このとき、磁気シールドの端から光電面までの軸方向の深さ d を変えたいくつかの条件で測定を行った。

図 5.34 に、 $d = 45 \text{ mm}$ (三角)、 $d = 25 \text{ mm}$ (丸) の場合の軸方向 (Z) の外部磁場に対するラストダイノード信号波高の変化を示す。測定の結果、 d が小さい場合には磁気シールドの効果は、この光電面を挿入する深さ d に強く依存することがわかった。特に、軸方向の磁場に対してはこの依存性は顕著であった。しかしこのシールドの形態においては、 $d = 40 \text{ mm}$ よりも大きくなると、シールドの効果は殆ど d に依存しなくなることがわかった。このとき、この形態の磁気シールドで 200 G までは問題なく PSPM が動作する。このテストの結果から、この寸法のシールドについては、磁気シールドをコンパクトに設計するためには d は 45 mm 程度が適切であると言える。なお、2 種類の横方向磁場 (X、Y) に

についても同様の測定を行ったが、横方向磁場に対してはこのシールドで、 $d = 20 \text{ mm}$ で 400 G まで測定精度の範囲内で出力の低下は見られなかった。

パーマロイ、ミューメタルは、鉄製の磁気シールドないの弱い磁場をさらに遮蔽する目的でよく使用される材料である。上述した鉄シールドの内部にこれらの金属の薄いシートで製作した補助磁気シールドを挿入してテストを行ったが、鉄シールドのみで得られた上記結果とほぼ同じ結果を得た。この結果は、前に述べたようにこのタイプの PSPM(H6568) の弱い磁場に対する高い耐性を確認する結果であると言える。

最終的に、上述した磁気シールドとほぼ同じ寸法で、厚さ 4 mm の ARMCO (99.99%軟鉄) の角形チューブの使用で、軸方向磁場に対しても 400 G の外部磁場に対して出力の低下を 2% 以下に抑えられることがわかった。このシールドを使用した測定結果も、上と同じ図 5.34 に示した。

このテストの結果、400 G 程度の磁場であれば比較的簡単な磁気シールドを施すことにより、問題なくこの PSPM を使用できることが明らかになった。

第6章

COMPASS 実験用シンチレーティングファイバー・トラックの建設と性能評価

前章で述べた試作機による開発研究の成果を受け、1999年にCOMPASS実験用SciFiトラックの実機の設計を行った。その基本的な仕様は第4章に述べた通りである。

我々は2000年から2001年にかけて段階的に4台のSciFiトラック・ステーションの建設を進め、2001年8月までに全ステーションの実験エリアへの設置を完了した。ドイツグループにより建設が行われた下流側4ステーションもほぼ同時期に設置が完了し、SciFiトラック系はCOMPASSの検出器系の中でいち早く、完全なシステムとしての形が整った。これにより、物理データ収集に先駆けて実験装置の最終セットアップの段階で行われたテスト実験においても、実際の測定データを用いたDAQやオフライン解析プログラムの最終的なテストを進める上で、SciFiトラック系は非常に大きな役割を果たすことになった。

本章では、まず実機の設計、建設から立ち上げまでの段階で行ったいくつかの準備と完成した実機の概要を述べる。続いて2000年から2002年までの3年間、COMPASSのテスト実験および本実験の測定において使用した中で得られたSciFiトラックの実機の性能を詳しく述べる。

6.1 COMPASS 実験用 SciFi トラックの建設

本節では、私が行ったCOMPASS実験用SciFiトラックのビームホドスコープ・ステーションとターゲット・ステーションの実機の設計および建設の概要を述べる。

実機の設計においては、有感領域全体にわたって一様な高い検出効率を保証するためにSciFiアレイ中のファイバー・コラム間ピッチの再検討が行われ、最終的に0.41 mmが採用された。6.1.1節に、マルチクラッド型ファイバーの使用に最適化したコラム間ピッチを決定するために行った計算の結果を示す。

私が建設を担当した4ステーション、計10プレーンのチャンネル数は合計で1152チャ

ンネルになり、72 台の PSC-PSPM モジュールが使用される。6.1.2 節では、COMPASS の実験条件で多数の PSPM を効率的に運転するためのアクティブ・ブースター回路を含めた高圧電源システムについて述べる。また、SciFi トラックの運転に必要な PSC を含めたすべての回路を各ステーションに搭載し、同時に大量の PSC チャンネルをリモートコントロールにより制御するために構築したユーロクレート・システムについて、6.1.3 節で解説する。続いて 6.1.4 節に、検出器の各チャンネルから一様な検出効率を得るために行った PSC-PSPM モジュールのプレチューニングのためのテストビームの結果を示す。

次に 6.1.5 節で、SciFi トラックを実際に実験エリアに設置するために要求された物質量の小さな架台と検出器ハウジングについて述べる。6.1.6 節で、実際に組み立てを完了し、実験エリアに設置した SciFi トラックの実機の写真をもとに、これらの実機の概要を解説する。

6.1.1 ファイバー・コラム間ピッチの決定

直径 0.5 mm のファイバーを最密詰めに積み上げた SciFi アレイでは、コラム間のピッチは 0.433 mm になる。シングルクラッド型ファイバーの場合、シンチレーティング・コアの直径は 0.47 mm であり、隣接するコラム中のファイバーのコアが重なる領域は全体の 6% 程度である。例えば DIRAC 実験用 SciFi トラックはこの仕様で製作され、高い性能を示している。

一方で、マルチクラッド型ファイバーのコア直径は 0.44 mm であり、最密詰めの場合の重なり部分は $10\ \mu\text{m}$ に満たない。このとき、実はコラムとコラムの間に入射した粒子が通過するシンチレーション物質(コア)の厚みは極端に小さくなり、十分な光量が得られなくなる。そこで実機の設計に際し、マルチクラッド型ファイバー使用に適したコラムのピッチを再検討した。

図 6.1 の左側の図は、直径 0.5 mm のマルチクラッド型ファイバー(コア直径 0.44 mm)を最密詰め(ピッチ 0.433 mm)に積み上げた SciFi アレイに垂直に粒子が入射した場合に、この粒子が通過する単一コラム中のシンチレーション物質(コア)の厚みを入射位置に対してプロットしたものである。厚みの値は、コラムの中心に粒子が入射した場合の最大の厚みに対する相対値で示した。各ファイバー・チャンネルに対応する PSPM のチャンネルで最終的に得られる光電子数は、この厚みに比例する。コラム間の重なり部分で隣接する 2 コラムを粒子が通過する場合は、厚みの大きい方のコラムについてプロットし、小さい方の値は破線で示した。

図 6.1 の右側の図は、粒子の入射位置に対する検出効率を理論的に計算した結果をプロットしたものである。この計算において、以下のような仮定を行った。まず、粒子がコラムの中心を通過した場合に得られる光電子数は、長いライトガイドを使用したターゲッ

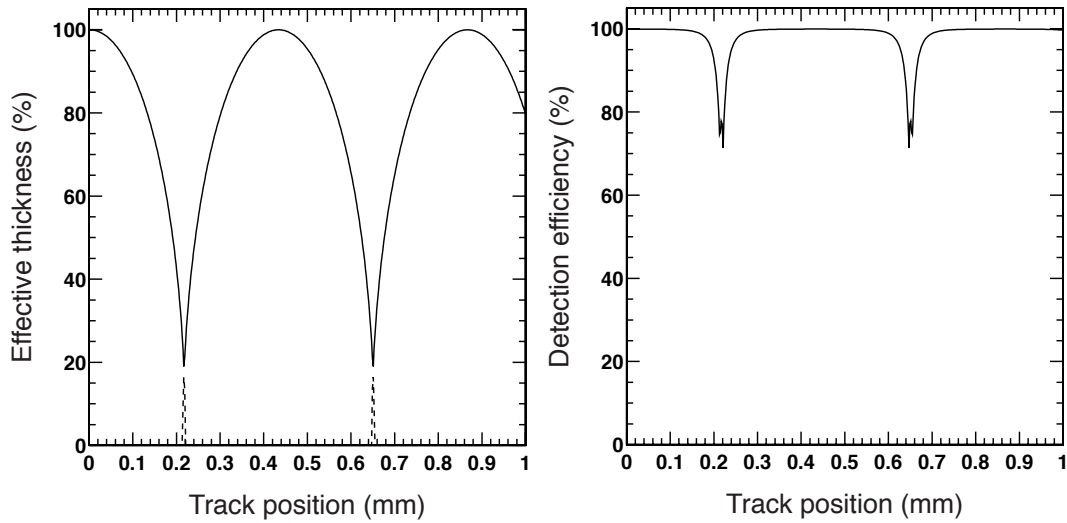


図 6.1: 0.433 mm ピッチの場合の、粒子の入射位置に対するシンチレーション・コアの厚み(左)と理論的に計算された検出効率(右)。

ト・ステーションで予想される値として 10 個とした。各入射位置で得られる平均の光電子数は、左の図で示した粒子が通過するコアの厚みから計算できる。イベント毎に得られる光電子数はポアソン分布に従う。このとき、2 個以上の光電子が得られた場合は検出され、1 個以下の場合は検出できないとする。なお、2 コラムを粒子が通過する場合は、いずれかのコラムで 2 個以上の光電子が得られた場合に検出できるとした。以上の仮定に基づいて計算した結果から、この条件では、コラムの間に極端に検出効率の低い領域が生じることがわかる。プレーン全体としての検出効率に与える影響は比較的小さいが、検出効率は有感領域中で一様であることが望ましい。

そこで、ピッチを変えながら同様の計算を行い、最終的に 0.41 mm を採用した。この条件で前出の図 6.1 と同じ計算を行った結果を図 6.2 に示す。この場合、検出効率の極端に低い領域はほとんどなくなり、プレーン全体にわたって 95% 以上が得られている。

ピッチをより小さくすればさらに検出効率は一様になるが、その場合マルチプリシティの増加や同じチャンネル数でカバーできる有感領域が小さくなる等の不利な点もある。これらの点を考慮し、最終的に、隣接コラムのコアの重なり部分がシングルクラッド型の最密詰めの場合とほぼ同等の比率になる 0.41 mm ピッチに決定した。

次に、0.41 mm ピッチの SciFi アレイに粒子が傾きを持って入射した場合の性能を調べるため、入射角度を変えながら同様の計算を行った。ビームホドスコープ・ステーションで計測するミュオンビームのダイバージェンスは 1 mrad (rms) 程度である。この程度の傾きでは、垂直入射の場合の上記結果と殆ど違いはない。しかし、ターゲット・ステーションでは散乱粒子の計測も要求される。特に SF3 では角度アクセプタンスが大きく、 ± 25 mrad

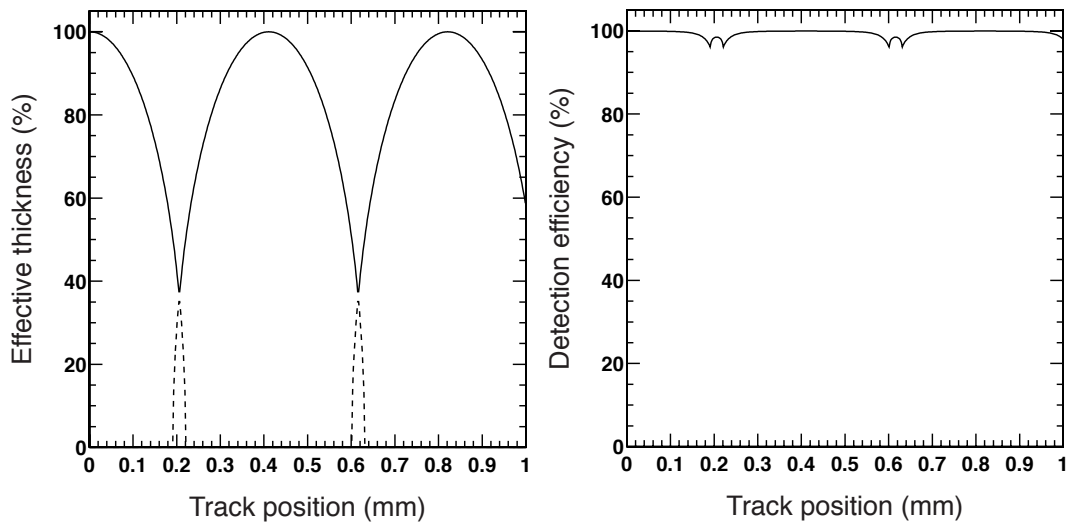


図 6.2: 0.41 mm ピッチの場合の、粒子の入射位置に対するシンチレーション・コアの厚み (左) と理論的に計算された検出効率 (右)。

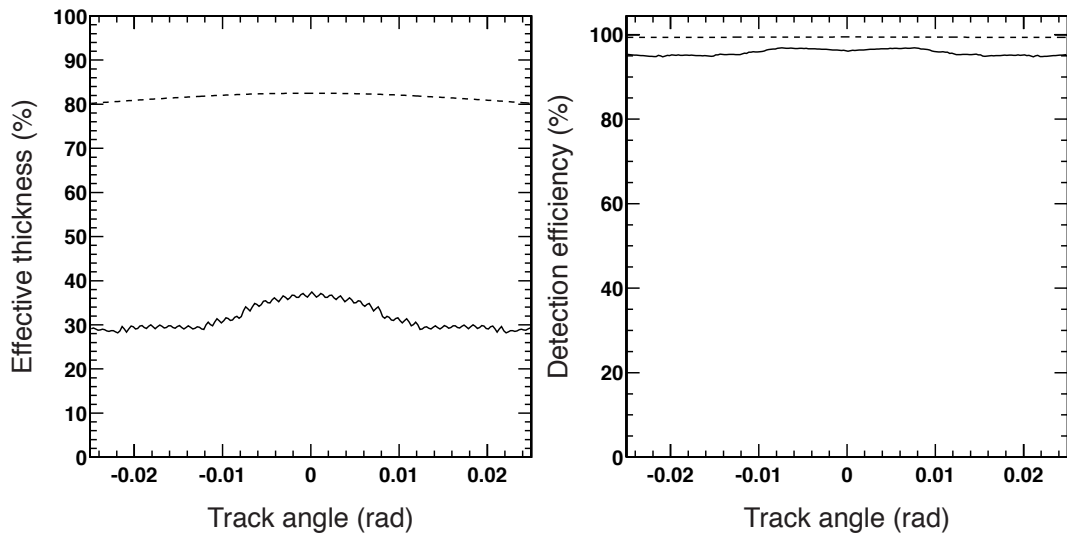


図 6.3: 粒子の入射角度に対する通過するシンチレーション・コアの厚み (左) と理論的に計算された検出効率 (右)。

までの傾きを持った粒子を検出する必要がある。

図 6.3 に、粒子の通過する厚みと検出効率の計算値を、入射角度に対してプロットした。各入射角度について、上に述べた垂直入射の場合と同様に入射位置を変えながら計算を行い、このとき得られた最小の値を実線で、プレーン全体で平均した値を破線で、それぞれプロットした。通過する厚みの最小値が角度によって細かく上下するのは、アレイが細い

丸型ファイバーの集合体でできていることに起因する。計算の結果、この範囲では角度を大きくしていくと厚み、したがって検出効率も減少する傾向にあるが、25 mrad 程度までの傾きであれば大きな変化はないことがわかった。これらの結果から、0.41 mm ピッチで製作した SciFi アレイにより、COMPASS の使用条件で一様な高い検出効率を得られると期待できる。

6.1.2 高圧電源とブースター回路

COMPASS-SciFi トラッカーでは、 2×10^8 muons/spill のビームが有感領域を直接通過する。スピルの幅を当初計画の 2.4 s とすると、プレーン全体の計数率は約 80 MHz となる。ビームホドスコープ・ステーションではプレーンあたり 6 本の PSPM を持つので、1 本あたりの平均の計数率は約 14 MHz となる。このときの PSPM 1 本あたりの出力電流は、以下のように見積もられる。まず、1 パルスあたりで得られる平均光電子数を 20 個と仮定する。印加電圧 700 V の場合の標準的なゲインは約 10^6 なので、1 パルスあたりの電荷量は

$$1.6 \times 10^{-19}(\text{C}) \times 20 \times 10^6 = 3.2 \times 10^{-12}(\text{C}) \quad (6.1)$$

となり、PSPM あたりの出力電流量は、平均計数率 14 MHz から、

$$3.2 \times 10^{-12}(\text{C}) \times 14 \times 10^6(\text{s}^{-1}) \sim 45(\mu\text{A}) \quad (6.2)$$

と計算できる。

H6568 のデバイダー抵抗値の合計は $2.86 \text{ M}\Omega$ であり、印加電圧 700 V の場合のデバイダー電流は約 $245 \mu\text{A}$ となる。したがって、出力電流値がデバイダー電流値の約 20% 程度と見積もられる。

実際には、プレーンの中央にあたる PSPM の計数率は平均値の 2 倍くらいになることが予想される。また、PSPM 個体間で増幅率のばらつきは $\pm 50\%$ 程度もあるので、これらを考慮すると、出力電流値とデバイダー電流値が同等の大きさになり得る。

通常、出力電流がデバイダー電流の 10% を超えるような使用条件下ではダイノードの電位が出力電流により変化し、ゲインが安定しなくなるので PSPM にブースター電源を使用し、最終段から数段のダイノードに直接電圧を供給する。COMPASS-SciFi では最終 4 段のダイノードをブーストする。この場合のブースターの最も単純な手法は、4 段のダイノードにそれぞれ独立な電源を使用することであるが、これは、予算的にも空間的にも経済的でない。したがって、ブースター回路を使用する。

特に、ビームホドスコープ・ステーションとターゲット・ステーションでは 1 プレーンを構成する全ての PSPM で 1 チャンネルの HV 電源を共有する手法をとった。高圧電源システムとして、ここでは CAEN 社の SY527 メインフレームを基礎としたシステムを使用す

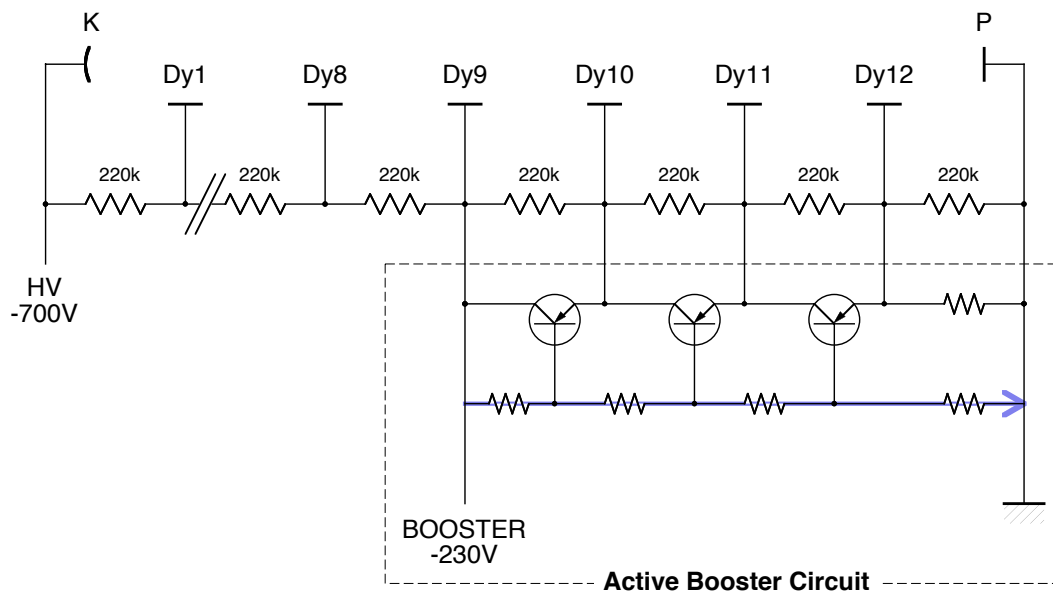


図 6.4: アクティブ・ブースター回路の簡略化した回路図。

る。HV 電源はデバイダー電流を供給するので、この電源の出力は、最大で 8 個の PSPM を駆動するため、700 V であれば、 $245 \mu\text{A} \times 8 = 1,960 \mu\text{A}$ 、すなわち 2 mA 程度の出力が要求される。ここでは、16 チャンネルを持つ A734N(CAEN) モジュールを使用した。

ブースター回路としては、各プレーンにつき 2 台のアクティブ・ブースター回路を使用する。図 6.4 にアクティブ・ブースター回路の簡略化した回路図を示す。実際にはバイポーラ型トランジスタではなく、電界効果型トランジスタ (p チャンネル型 MOS-FET) を使用している。

無信号時には、ブースター回路内ではデバイダー・チェーンにのみ電流が流れ、各ゲート、ソースの電位が決定している。信号が発生し、ダイノード電流が流れると、トランジスタのチェーンにダイノード電流を供給するように必要なだけ電流が流れ、ダイノードの電位を安定させる。いわば、各ダイノードに独立な電源を接続したのと同様に動作する。

トランジスタを使用せず、外部に抵抗値の小さなデバイダー・チェーンを取り付けたブースター回路も使用可能であるが、この場合、出力電流に対し十分に大きな (1 mA 以上) 電流が常に流れることになる。アクティブ・ブースター回路では、デバイダー・チェーンは各ゲートの電位を保証するだけの小さな電流を流せばよく、信号発生時にのみ大きな電流が流れるので、原理的に電力消費量を小さくすることができる。また、出力電流によらず各ダイノードの電位が保証されるので、高いリニアリティを保つことができる、といった利点がある。

COMPASS では、PSPM あたり 1 mA 程度の出力電流に対応するため、各プレーンにつ

表 6.1: ユーロクレート・システムの例。

Station #	Module
1	High-Voltage distributor
2	Remote control adaptor
3	Active booster circuit module A
4	PSC module 1
5	PSC module 2
6	PSC module 3
7	PSC module 4
8	PSC module 5
9	PSC module 6
10	Active booster circuit module B
11	Crate controller module
12	Power supply module (Negative -6 V)
13	Power supply module (Positive $+6\text{ V}$)

き 2 台のブースター回路を使用し、3 または 4 本の PSPM で共用する。ブースター電源には、最大出力電流 13 mA の A753N 電源モジュールを使用する。このモジュールは 1 台で 9 チャンネルあり、これを 3 台使用する。

これらにより、ビームホドスコープ・ステーションで使用する全 72 本の PSPM に対し、HV 電源 10 チャンネル、ブースター 20 チャンネルの 30 チャンネルのみの HV 電源で運転でき、HV 電源にかかるコストを抑え、また、ケーブルも少なくできた。

6.1.3 ユーロクレート・システム

私が担当した COMPASS-SciFi トラッカーのビームホドスコープ・ステーションとターゲット・ステーションでは、各プレーンで使用される全ての PSC-PSPM モジュールと、これを運転するのに必要な様々な回路をコンパクトに収納して検出器本体のすぐ近くに設置し、かつ簡単に交換できるように、ユーロクレート (Europa Chassis) の規格に基づいたモジュールシステムを構築した。一般の規格に従うことで、使用される多くの部品を安価に入手することができ、システム全体を低予算で構築することができた。

クレートは各プレーンにつき 1 台を製作し、PSC モジュールの他に、高電圧の分配回路、アクティブ・ブースター回路をモジュール化して収納する。また、背面のバスを使用して Low-Voltage 電源と PSC のリモート・コントロール用の信号が各 PSC モジュールに伝達される。表 6.1 に、ビームホドスコープ・ステーションの場合のクレート内の各モ



図 6.5: SF2 ステーション Y プレーンのユーロクレート。

ジュールの配置例を示す。また、図 6.5 に、各モジュールを装着したクレートの写真を載せた。ターゲット・ステーションの場合は 1 プレーンにつき 8 台の PSC モジュールが使用される。

このクレートには PSPM の磁気シールドボックスが取り付けられている。このユーロクレート・システムの使用により、極めて簡単に PSC-PSPM モジュールの交換を行うことができる。

各ステーションで使用される PSC をリモートコントロールにより制御するため、このユーロクレート・システムに基づいて、図 6.6 に示すようリモートコントロールのシステムを構築した。

コントロールには計測室に設置した専用の PC を使用する。コントロール用の信号は PC から 30 m のケーブルで実験エリア内のスイッチボックスに送られ、ここから各ブランチに別れてクレートと接続される。

RS485 プロトコルの使用により、最大で 8 ブランチ $\times$ 31 台のディスクリミネーターを取り扱うことができる。ここではブランチ #0 ~ 2 の 3 チャンネルを使用し、ブランチ 0 で SF1 と SF2、ブランチ 1 で SF4、ブランチ 2 で SF3 に使用する各 24 台ずつの PSC モジュールの制御を行う。

同時に、クレートの電源のオン/オフもリモートコントロールにより行う。このために各クレートにはコントローラー・モジュールが設置されている。クレート・コントロールには独立なブランチを使用し、ブランチ 3 で SF1 と SF2、ブランチ 7 で SF3 と SF4 のコ

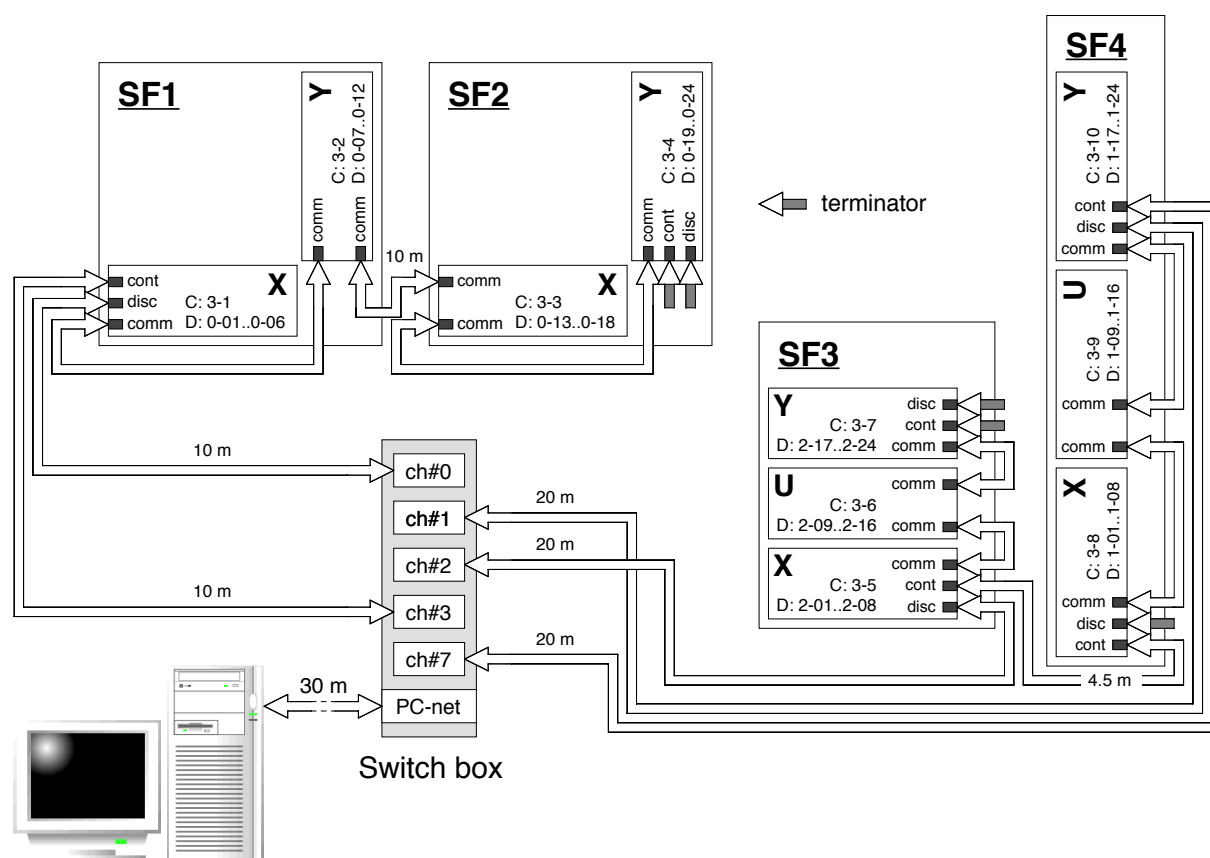


図 6.6: リモートコントロールの構成。

ントローラーを制御する。

PSC とクレートコントロールの信号は別々のケーブルを通してクレートに送られ、クレートのバスとクレート間では共通 (common) のラインで伝達される。

このリモートコントロール・システムにより、大量の PSC チャンネルを非常に簡単に扱うことが可能になった。

6.1.4 PSC-PSPM モジュールのプレチューニング

検出器全体で一様な検出効率を得るために、SciFi トラッカーでは PSC 各チャンネルの閾電圧の調整を行う。調整のコンセプトは前の章ですでに述べた試作機の場合と同じで、各チャンネルの検出効率とマルチプリシティとの最適なバランスにより閾電圧の決定を行うことが重要である。最終的には、実機のファイバー・バンドル、PSPM、PSC を完全に組み上げた上で、実際の使用条件でこの調整を行うことが望ましいが、これはそう単純ではない。すなわち、各ファイバー・チャンネルの検出効率を正確に評価するためには複数

の飛跡測定器を使用した精密な飛跡の再構成により、そのファイバー・コラムを粒子が通過したイベントを正確に選択しなければならない。そのためには高い位置分解能を持った数台の飛跡測定器が必要であり、また、複雑な解析を行わなければならない。

そこで我々は、実機で使用するすべての PSC について、実機への装着前に以下に述べるような方法でプレチューニングを行った。結果的に、このプレチューニングでかなり正確な調整を行うことができることが示された。

プレチューニングのコンセプト

これまでの経験から、多層構造を持つファイバー・バンドルの各コラムから得られる光子数(光量)は、高い技術で製作された場合比較的均一であることがわかっている。これに比較して、PSPM の増幅率のばらつきはずっと大きい。H6568 の場合、ある PSPM の各 16 チャンネルでの増幅率のばらつきは、メーカーによれば最大で 2 倍程度とされている [77]。すなわち、PSC のチューニングにおいては一定の光量に対する PSPM 固有の各チャンネルの出力(陽極感度)に対して閾電圧を調整することが本質的である。

そこで、前の章ですでに述べたように、我々は個々の PSC カードに固有の PSPM を直にハンダ付けし、各 PSC と PSPM の組を一体のモジュール(PSC-PSPM モジュール)として取り扱う。こうして対応する PSPM の出力に対して PSC のチューニングを行えば、同じような光量のファイバー・バンドルに接続すれば、PSC から得られる性能(検出効率、マルチプリシティ等)はいつも一定である。

印加電圧

ところで、同じ高電圧を印加した場合の PSPM 個体間の増幅率のばらつきは PSPM 内のチャンネル間のばらつきよりもさらに大きい。このばらつきは、個々の PSPM に印加する電圧を調整することによっても補正できる。

だが、もしも複数の PSPM を同じ印加電圧で使用できれば、実用上大きなメリットがある。すなわち、それら複数の PSPM に対し 1 台(1 チャンネル)の高圧電源のみ使用すればよいし、高電圧用のケーブルの本数も少なくできる。特に、ブースターを使用する場合に個々の PSPM に独立な電源を使用するのは費用の点でもスペースの点でも、経済的でない。

5.3.7 節に示した通り、COMPASS-SciFi トラッカーと同等な仕様の試作機のテストで、適正な PSC のチューニングを行えば幅広い印加電圧の範囲において、一定の性能が得られた。そこで我々は、プレーンごとに、そこで使用されるすべての PSPM に 1 チャンネルの HV 電源を使用して同じ印加電圧 700 V で運転する方法を選択した。

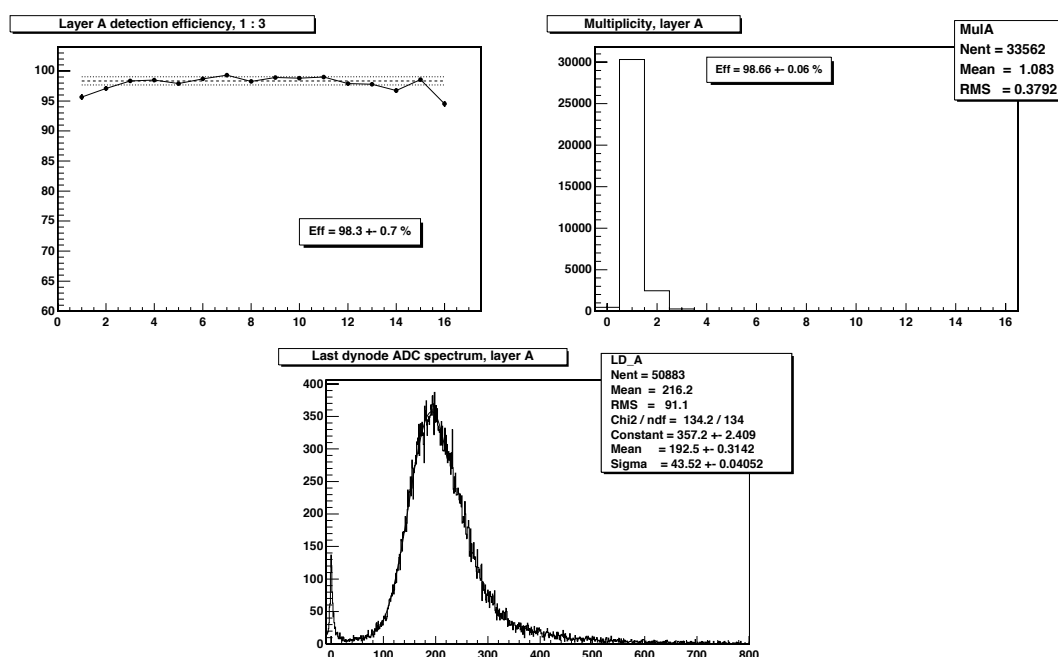


図 6.7: PSC-PSPM モジュールのプレチューニングの結果。チューニング後にモニタープログラムで得られた各チャンネルの 1 対 3 検出効率、マルチプリシティ分布。下段はラストダイノード信号波高分布。

テストビームを用いたプレチューニング

プレチューニングは、専用のファイバー・バンドルを使用し、テストビームにより行われた。PSC の大量生産が段階的に行われたのに合わせて、チューニングも 3 回のテストビームにわけて行われた。

COMPASS-SciFi トラッカーのビームホドスコープ・ステーションとターゲット・ステーションで使用する PSC-PSPM モジュールは合計 74 台である。このうち、SF1 と SF2 で合計 24 台、SF3 と SF4 は、各 24 台を使用する。

これらは、最終セットアップのリモートコントロールで 24 台ずつ 3 つのブランチに割り当てられる。それぞれ、SF1、SF2 用の 24 モジュールをブランチ 0 (No. 001-024)、SF4 用の 24 モジュールをブランチ 1 (No. 101-124)、SF3 用の 24 モジュールをブランチ 2 (No. 201-224) に割り当てる。これにスペアモジュール 4 台 (便宜上 No. 225-228 とする) を加えた計 76 台のチューニングを行った。

プレチューニングで正しい調整を行うためには、ファイバー・バンドル各チャンネルから得られる光量が一様であり、かつ実機のそれと同等であることが必要である。

チューニング用のバンドルは、ビームホドスコープ・ステーションと全く同じ仕様 (コラムピッチ 0.41 mm、7 レイヤー、クリアファイバーの長さ 50 cm) で製作した 16 ファイ

バー・チャンネルのバンドルを、A と B の 2 プレーン重ねたものである。これは、コラムピッチが異なるほかは前出の H7 試作機と同一である (図 5.11 参照)。

ターゲット・ステーションではこれより光量が 30% 程度少ないことが予想されるので、ブランチ 1、2 のモジュールのチューニングでは上記バンドルの SciFi アレイ端面につけられたアルミ蒸着マイラーを取り除き、光量を減らして使用した。この場合に得られる光量は、ターゲット・ステーションのそれを擬似的に再現していると期待できる。

チューニングは CERN-PS の T9 および T11 ビームラインにおいて行われた。A、B 両プレーンに接続された PSC はともに TDC (LeCroy 3377) に接続して読み出しを行う。調整されるモジュールのラストダイノード出力は、PSC カード上のプリアンプを通して ADC で読み出した。PSPM への印加電圧は一律 700 V とした。実験装置のセットアップは前章節で述べたテスト実験とほぼ同様である (図 5.13 参照)。一方のプレーン (A) は近接トラッキングおよびトリガーに使用し、他方 (B) のモジュールがチューニングされる。モジュールは 1 台終了毎に交換し、順次チューニングを行っていく。

このテストでは、テストビーム用のオンライン解析プログラムを使用する。各チャンネルの 1 対 3 検出効率とヒットマルチプリシティを測定しながら、プレーン全体で一様な検出効率を得るように閾電圧を調整していく。

図 6.7 に、閾電圧の調整を行った後に得られた、モジュール各チャンネルの 1 対 3 検出効率とマルチプリシティ分布を示す。さらに、ラストダイノード信号波高分布の例も示した。プレチューニングの条件として、マルチプリシティは 1.1 以下を要請し、モジュールでの 1 対 3 検出効率の平均値 $98.3\% < \epsilon_3 < 99.2\%$ 、ばらつき 0.7% 以下 (rms) とした。

図 6.8、6.10 および 6.10 に、チューニングの結果をまとめて示す。各図の横軸は前出のモジュールの番号を示す。

各図に、それぞれ上からモジュールの全チャンネルで平均した検出効率、マルチプリシティをプロットし、最下段には参考のため、ADC で得られたラストダイノード出力の信号波高分布のピークの位置を示した。検出効率は、各チャンネルの 1 対 3 検出効率の平均値 (菱形) とマルチプリシティ分布の 0 ヒット (不感イベント) のイベント数の割合で決まる全体の検出効率 (四角) を示した。全体の検出効率は、1 対 3 検出効率に比べていつも少し高い値になっているのがわかる。1 対 3 検出効率の平均値には、各チャンネルから得られた検出効率ばらつき (rms) を誤差として示した。なお、ラストダイノード出力は、同じグループ内の各 PSPM の平均値に対する相対値で示した。PSC に搭載したプリアンプの増幅率のリニアリティを仮定すれば、PSPM 毎の増幅率のばらつきは最大で $\pm 50\%$ 程度もあるのがわかる。顕著に小さな増幅率を示した 2 本の PSPM (227、228) は、スペアモジュールに装着した。

このように、各モジュールはプレチューニングにおいてほぼ一様な性能になるように、PSC 各チャンネルの閾電圧が調整されたこの結果からわかるように、PSPM 個体間で増幅

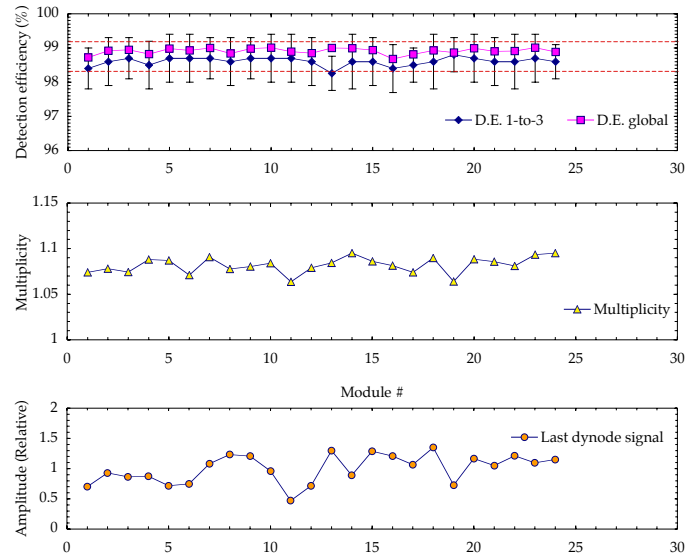


図 6.8: ブランチ 0 の PSC-PSPM 各モジュールのプレチューニングの結果。プレチューニング後に得られた各モジュールの検出効率 (D.E.1-to-3: 1 対 3 検出効率の平均値、D.E. global: モジュール全体の検出効率)、ヒットマルチプリシティ (Multiplicity) とラストダイノード信号波高の平均値 (Last dynode signal)。横軸はモジュール番号。

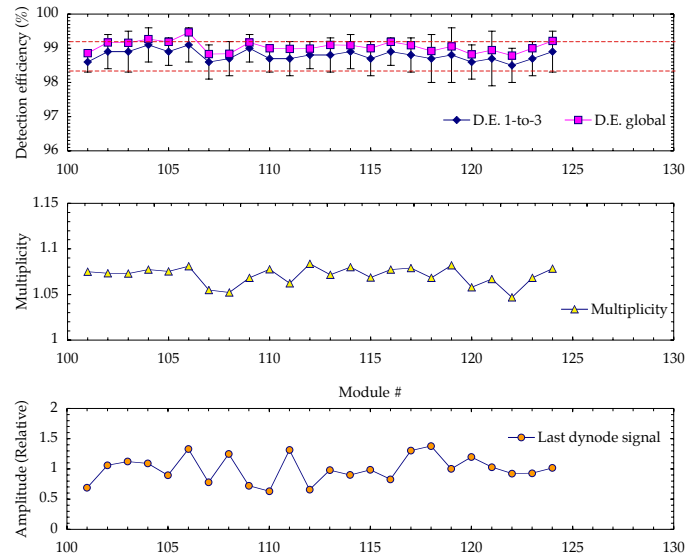


図 6.9: ブランチ 1 の PSC-PSPM 各モジュールのプレチューニングの結果。プレチューニング後に得られた各モジュールの検出効率 (D.E.1-to-3: 1 対 3 検出効率の平均値、D.E. global: モジュール全体の検出効率)、ヒットマルチプリシティ (Multiplicity) とラストダイノード信号波高の平均値 (Last dynode signal)。横軸はモジュール番号。

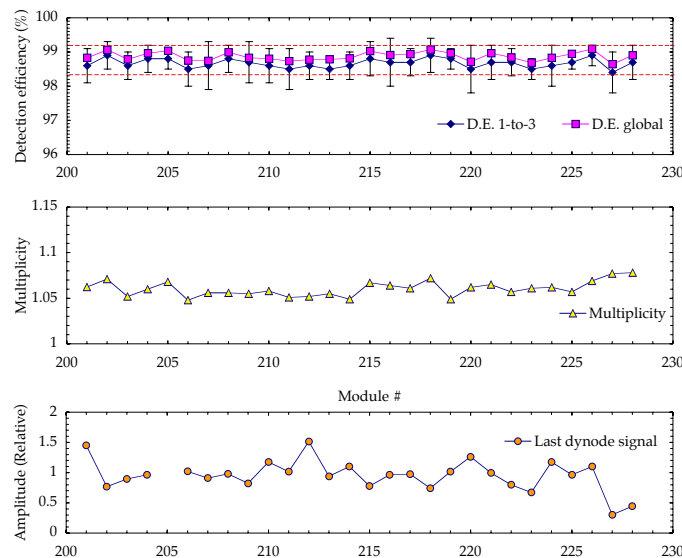


図 6.10: ブランチ 2 の PSC-PSPM 各モジュールのプレチューニングの結果。プレチューニング後に得られた各モジュールの検出効率 (D.E.1-to-3: 1 対 3 検出効率の平均値、D.E. global: モジュール全体の検出効率)、ヒットマルチプリシティ (Multiplicity) とラストダイノード信号波高の平均値 (Last dynode signal)。横軸はモジュール番号。

率に大きなばらつきがあっても、PSC の閾電圧の調整のみで、検出効率およびマルチプリシティについて一様な性能が得られた。

6.1.5 架台と検出器ハウジングの製作

SciFi トラッカーを実験装置中に設置するためには、架台が必要である。COMPASS で使用する大強度偏極ミューオンビームは、比較的高いフラックスの、指数関数で分布するビームハローを伴っている。ビームハローによる 2 次生成粒子は下流側の測定系のバックグラウンドとなり得るので、これを避けるためにビーム周辺の物質量は極力減らさなければならない。COMPASS からの要請は、有感領域の周辺 1 m 四方にファイバーと比較して無視できる程度の材料のみを用いた架台を建設する、というものであった。

架台だけでなく、ファイバー・バンドルから PSPM までは設置の際完全に遮光しなければならないので、有感領域である SciFi アレイを納める遮光箱が必要である。この遮光箱を検出器ハウジングと呼び、これもまた、同様に軽い材料で製作する必要がある。

そこで我々は、Rohacell[81] という極めて密度の小さいプラスチック板を使用した架台およびハウジングの製作を行った。Rohacell は発泡スチロールのような非常に軽い材質でありながら、かなり精度のよい機械工作も可能である。われわれの使用した Rohacell-IG には

密度の異なる 6 種類がラインナップされているが、このうち密度 52 kg/m^3 の Rohacell 51 IG を使用した。

図 6.11 と図 6.12 にそれぞれビームホドスコープ、ターゲットステーション用のハウジングの組立図を示す。それぞれ、ファイバー・バンドルを取り付けた状態を図に表した。

ハウジングの殆どの部品は Rohacell で作られている。遮光のため、各パーツの Rohacell には薄い (0.25 mm 厚) 黒色 PVC フィルムを貼り付けた。各パーツの接合部分には、光漏れを防ぐため厚さ 2 mm ほどの柔らかいラバーを貼った。このハウジングの利点は、ネジ留め式にしたことで非常に簡単に開閉できる点である。遮光の目的で広く使用されている黒色のスコッチテープは、接合部分に一切使用していない。ネジ留めのみで光の漏れ込みが全くないことを、PSPM の信号の観測により確認した。ネジは黒いデルリンで製作した。

図 6.11 と図 6.12 に示したように、1 個のハウジングに 1 ステーションを構成する 2 ないし 3 台の全てのプレーンの SciFi アレイを収納する。ハウジングに対する SciFi アレイの位置は、正確にアレイ幅と同じ間隔で固定された Rohacell のサポートによって決定され、着脱時にも再現される。

6.1.6 実機の建設と実験エリアへの設置

ビームホドスコープ・ステーション

2000 年の 6 月までに、まず SF1、SF2 の 2 台のビームホドスコープ・ステーションを建設し、実験エリアへの設置を行った。図 6.13 に、実験エリアに設置された SF1(左)、SF2(右) 各ステーションの写真を示す。2 台のビームホドスコープ・ステーションは、全く同一の仕様を持つ。約 1 m 四方の Rohacell の板の中心に、やはり Rohacell を主な材料とした検出器ハウジングが取り付けられている。ともに直交する XY の 2 プレーンで構成され、ファイバー・アレイはハウジング中に納められている。各プレーンにつきライトガイドの長さは 50 cm であり、黒いチューブで遮光してある。PSC と PSPM は、フレームに取り付けられたユーロクレートと、クレートに取り付けられた鉄製の磁気シールド兼遮光ボックスに挿入されている。SF1 は実験エリアの最上流、VO1 と VI1 カウンター (VETO システム) の直後に設置されている。写真は下流側から見たものである。SF2 は偏極標的用 SMC 電磁石のすぐ上流に、やはり VETO カウンターと共に置かれている。

ターゲット・ステーション

2000 年の終盤から 2001 年にかけて、SF4 と SF3 ステーションが順次建設された。

図 6.14 の 2 枚の写真は SF3 ステーションを示す。左の写真のように、標的直後の飛跡測定器である SF3 を標的にできる限り近付けるため、特別なサポートを使用して偏極標的

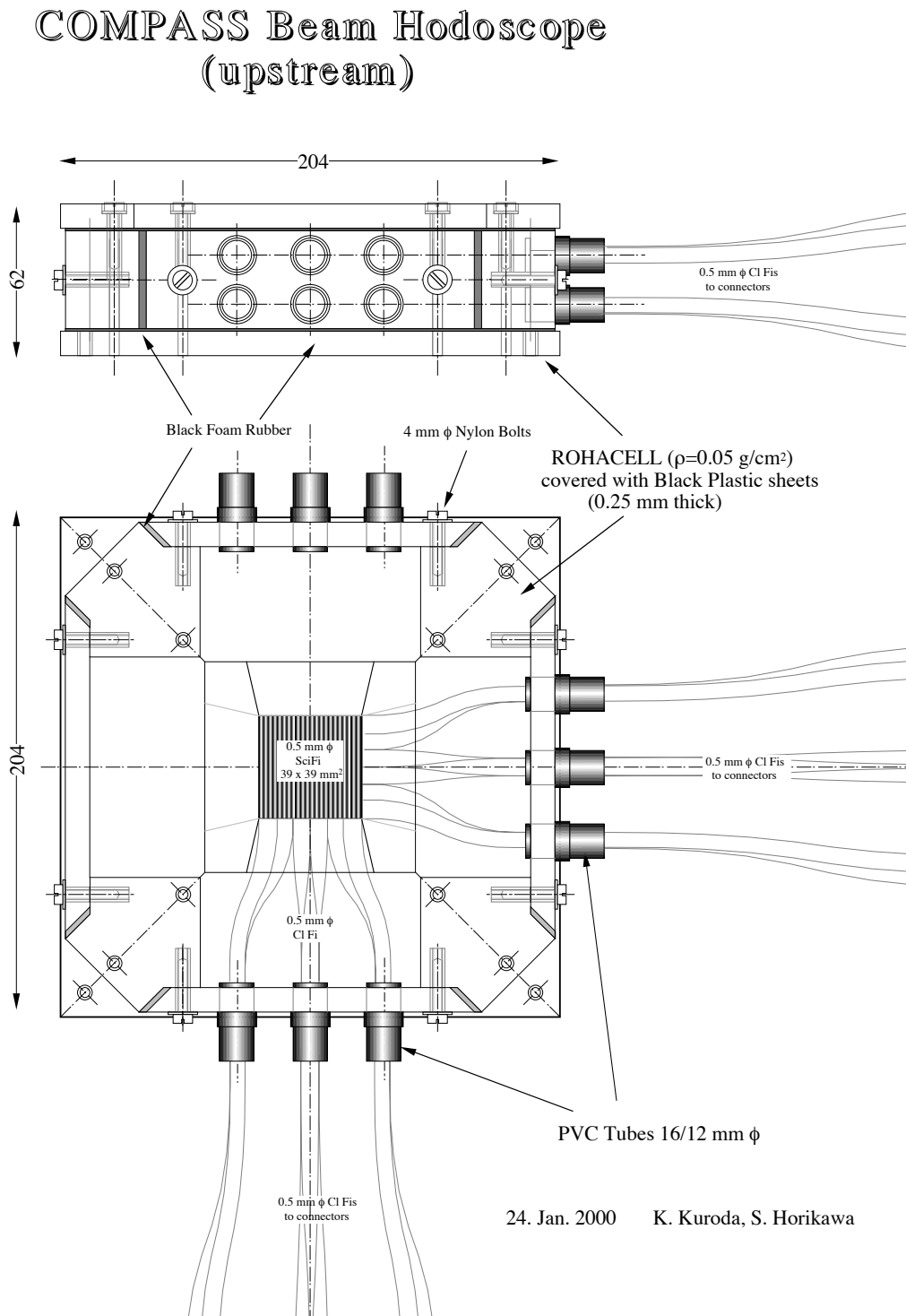


図 6.11: ビームホドスコプ・ステーション (SF1、SF2) 用検出器ハウジング。

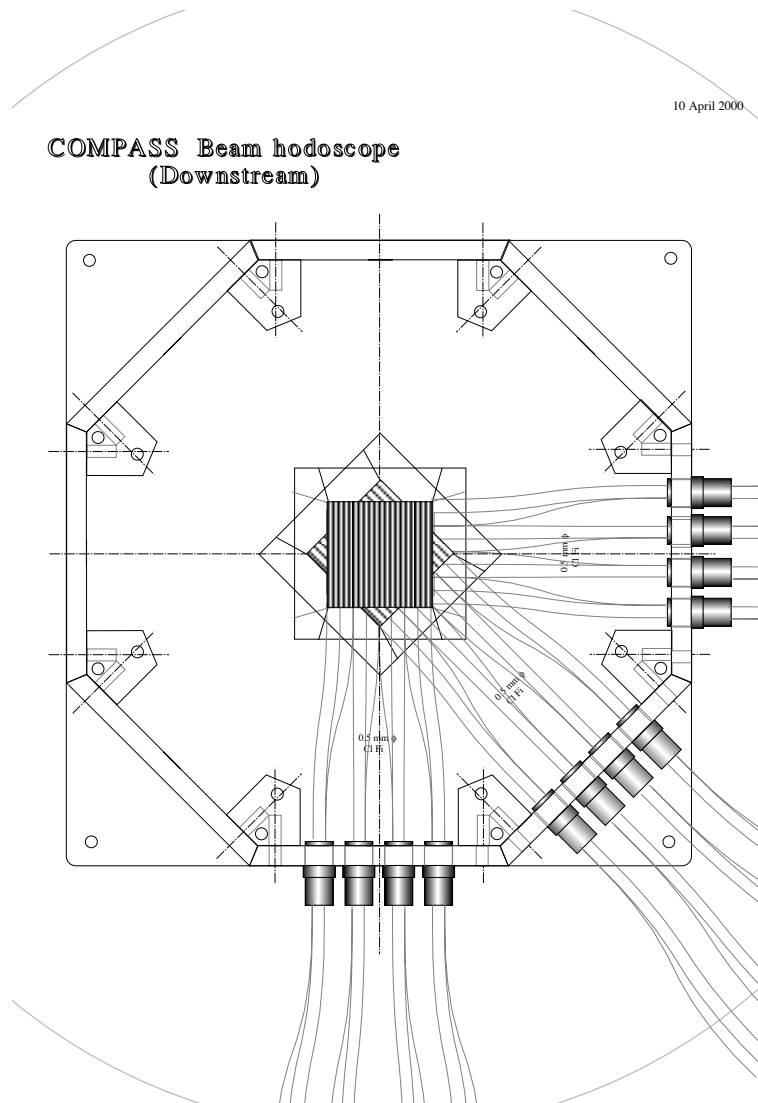


図 6.12: ターゲット・ステーション (SF3、SF4) 用検出器ハウジング。

用ソレノイド電磁石のフランジに直接ハウジングを取り付けた。右の写真はハウジングの蓋を開けた状態で内部の SciFi アレイを撮影したものである。直交する XY プレーンに加え、45 度傾けた U プレーンが重ねられている。中心の白く見える部分が、有感領域である SciFi アレイである。各プレーンの有感領域の大きさは約 $5 \times 5 \text{ cm}^2$ である。クリアファイバー・ライトガイドは 16 チャンネル単位 (PSPM 単位) で束ねられ、ハウジングの側板に取り付けられたプラスチック製のシリンドラーを通して黒いチューブに導かれている。

SF4 ステーションは、図 6.15 のような大きなフレームに取り付けられ、他の飛跡測定器と共通の巨大なサポート構造のレールに架けられている。スペクトロメーターのアクセプタンスを空けるためにフレームの開口部は約 2m 四方あり、 $1.25 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 程度の Rohacell

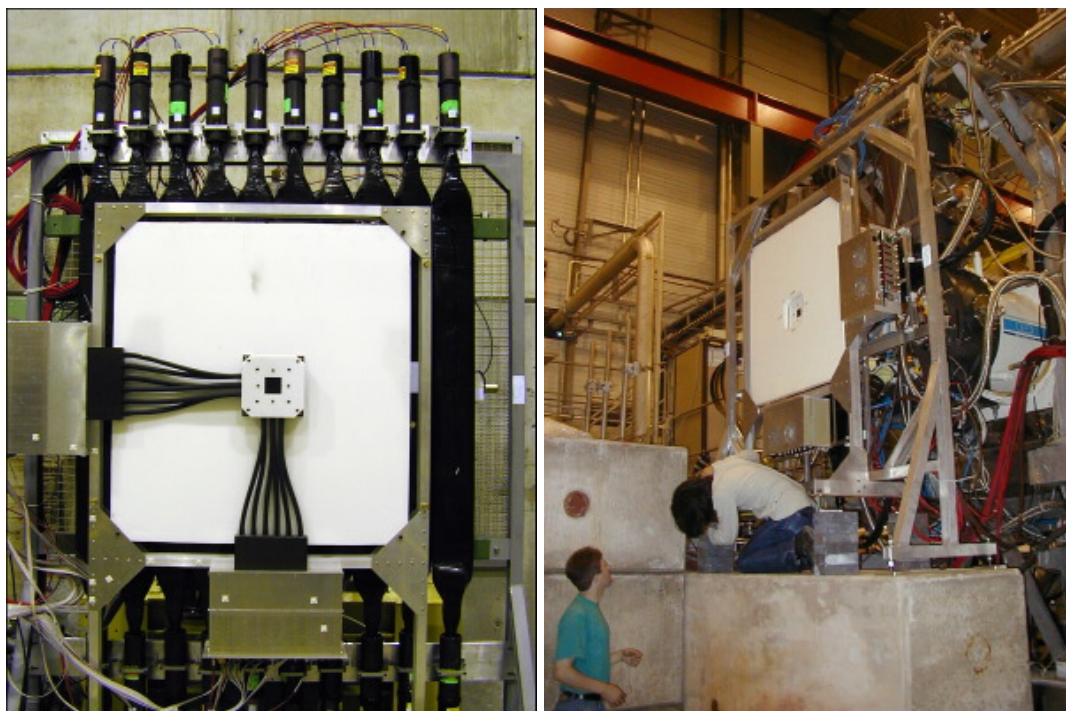


図 6.13: SF1 と SF2 ステーション。

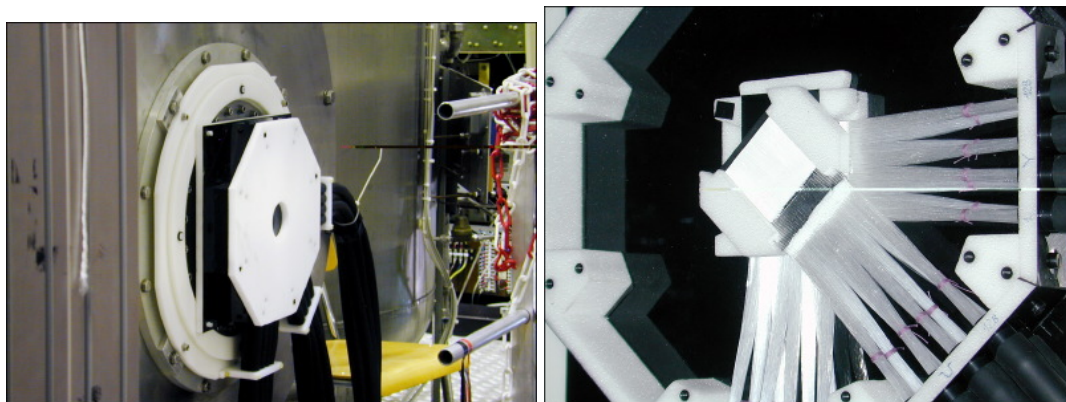


図 6.14: SF3 ステーション。

の板の中心にハウジングが取り付けられる。SF3 同様長いライトガイドを使用している。SF4 では長さ 2m のライトガイドが使用され、PSPM はフレーム上に取り付けられた磁気シールドボックスに挿入されている。SF4 ステーションも XYU の 3 プレーンにより構成されている。このステーションは数台の Micromegas で構成される SM1 上流の飛跡測定系の中の狭いスペースに挿入されるため、クレート以外の部分は全体が厚さ 8 cm に納まるようにフレームをデザインした。フレームの製作も、ロシアグループと協力して行った。

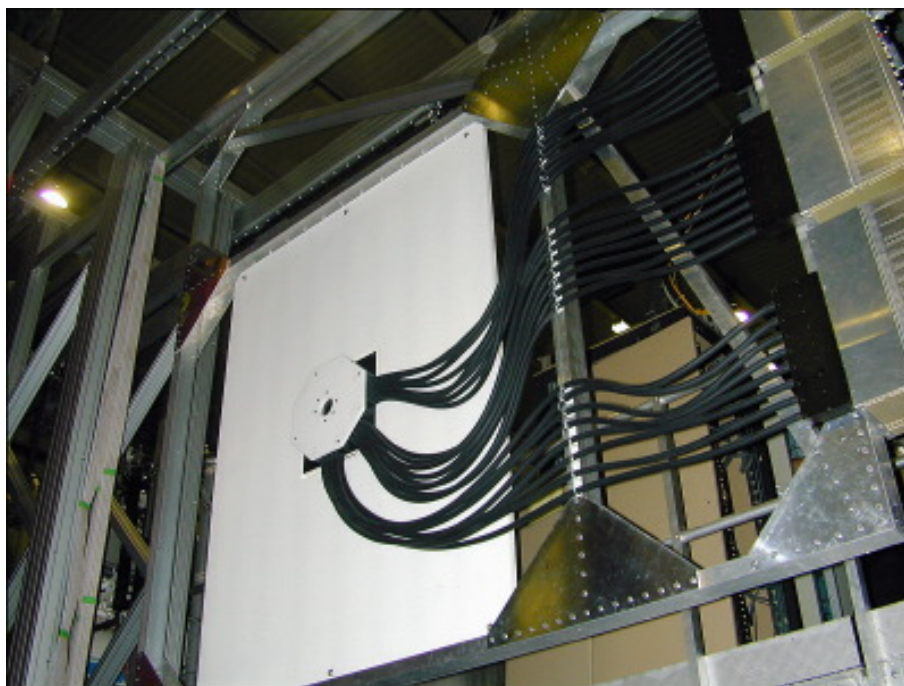


図 6.15: SF4 ステーション。

6.2 COMPASS 実験での運転と性能評価

2000 年のテストランにおいて、SF1、SF2 の 2 台のビームホドスコープ・ステーションをはじめて COMPASS の実験条件で使用した。2001 年には残る 2 台のターゲット・ステーション、SF3、SF4 の設置を完了し、私が担当した全 4 ステーションが完全な形で揃った。これら 4 ステーション、全 10 プレーンを使用し、2001 年のビームタイムの終盤と 2002 年の 6 月から 9 月までの 3 か月間に行われた本実験で物理のデータ収集が行われた。

実験中はオンラインモニタリング・プログラムを使用して絶えず SciFi トラッカーの状態をチェックし、全ステーションが安定に動作していることを確認するとともに、収集データのオフライン解析により、定期的に SciFi トラッカーの基本性能の評価を行った。本節では、これらのデータ解析と、その結果により示された実験の使用条件での SciFi トラッカーの性能について述べる。

6.2.1 オンラインモニタリング

本節で示す測定データの解析には、COMPASS のオンラインモニタリング・プログラム、COOOL が多く使用された。図 6.16 に、COOOL によるオンラインモニターウィンドウの例を示す。COOOL は物理解析でなく測定器系の動作モニターのための解析を行うツール

第 6 章 COMPASS 実験用 SCIFI トラッカーの建設と性能評価

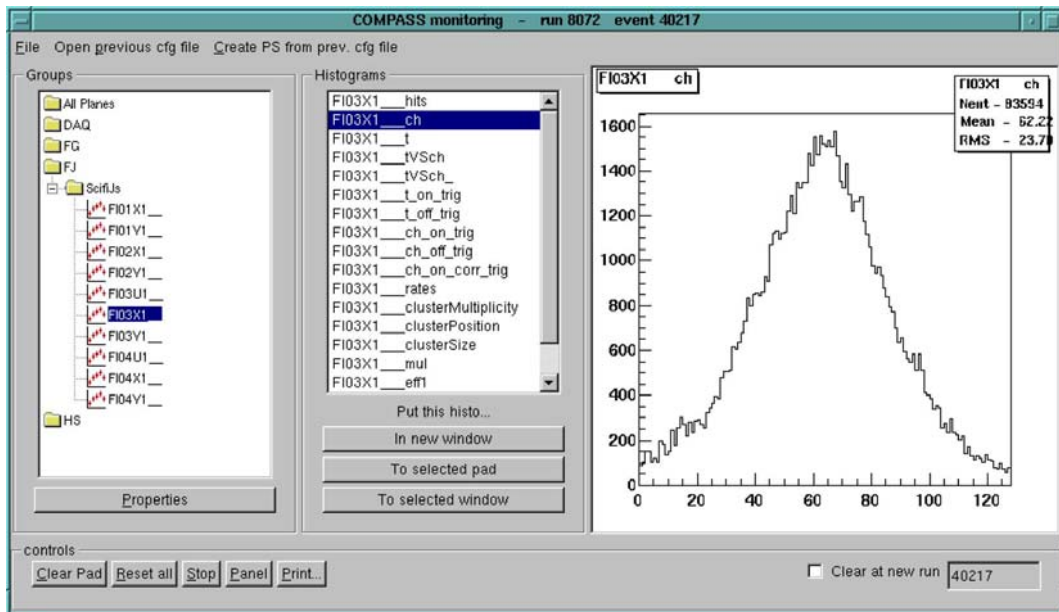


図 6.16: COOOL のオンラインモニターウィンドウ。

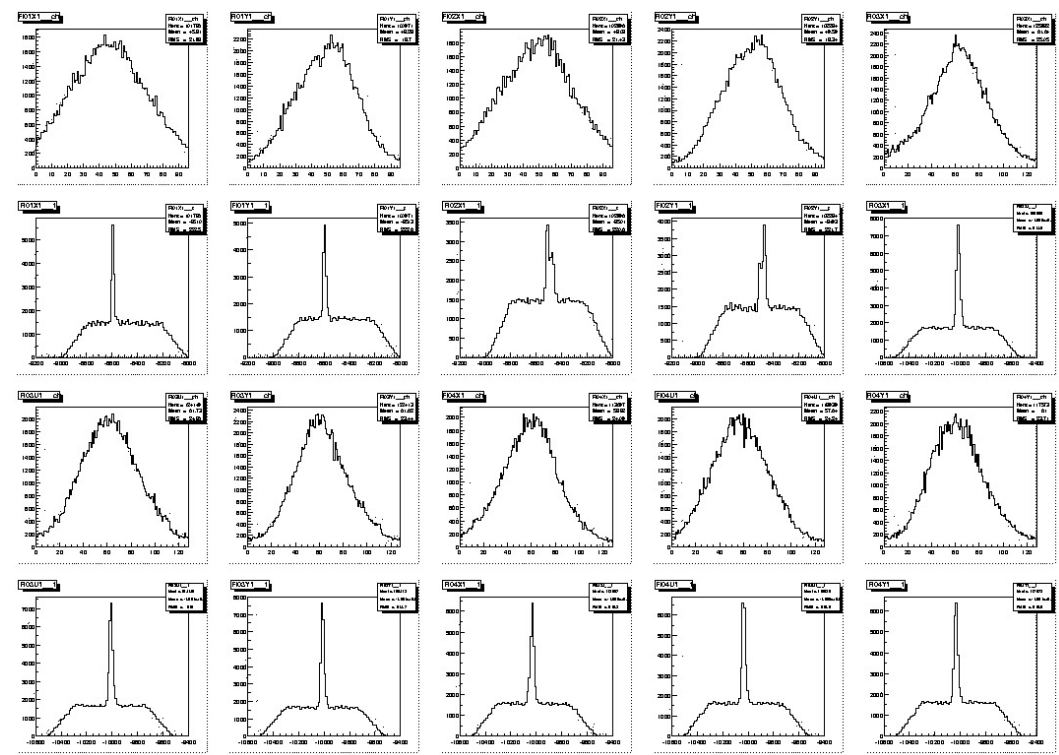


図 6.17: SciFi トラッカーのオンラインモニタリングの例。

で、データ・ストリームにアクセスし、オンラインでサンプリングした一部のイベントについて解析を行うだけでなく、ハードディスクに記録された単一のデータファイルを読み込んで、オフラインで解析を行うこともできる。

各検出器ごとに、単一の検出器プレーンに関するパラメーターを扱う PlaneXX クラス (XX には検出器名が入る)、同一システム中の複数のプレーンを取り扱うことのできる GroupXX クラス (同上) が用意されており、各検出器グループはこれを書き換えることで必要な解析を行うことができる。例えば私が担当した SciFi トラッカー上流 4 ステーションの場合、PlaneSciFiJ クラス、GroupSciFiJ クラスがそれに当たる。

COOOL は自身で解析を行うだけでなく、ROOT の TREE 形式のファイルを生成する機能も持つ。複数のファイルを使用する比較的高い統計を必要とする解析には、このようにして作成した ROOT ファイルを用いた。

実験中は、シフト担当者がこの COOOL を使用してランごとに全測定器系が正常に動作しているかのチェックを行う。各検出器系についてチェックすべき項目は、検出器グループから供給される configuration ファイルによって指定される。

図 6.17 に、私が担当した上流 4 ステーションの SciFi トラッカーに関するシフト用モニター画面の例を示す。私は、全 10 プレーンのヒットマップ (ビームプロファイル) と、トリガー信号との時間差の TDC 分布をモニター用に指定した。SciFi トラッカーはビームを直接入射して計測しており、この TDC 分布の S/N 比からトリガーの purity の情報も得ることができる。

6.2.2 ビームプロファイル

SciFi トラッカーはビームを直接計測するので、各チャンネルで計測されたイベント数の単純な分布 (ヒットマップ) から、入射ミューオンビームのプロファイルを得ることができる。COMPASS で使用する F1-TDC はマルチヒット TDC なので、タイムウィンドウ中に複数のヒットが予測される高いビーム強度でも正しいカウント数が得られる。トリガーによるバイアスを排除した正確なプロファイルを得るためには、ランダムトリガーの使用、あるいはトリガーと相関のないタイミングでカットをかけるなどする必要がある。

図 6.18 に、2001 年のビームタイムにはじめて全 10 プレーンから測定された、 2×10^8 muons/spill の大強度ミューオンビームのプロファイルを示す。実際の実験条件でも、10 プレーンの全 1,152 チャンネルがすべて動作し適正なビームプロファイルが得られている。

ビームプロファイルは各ステーションでの入射ビームの形状、大きさの情報を与える。ビームはほぼガウス分布をしており、ビームの大きさは各ステーションで $\sigma_x \sim 10$ mm、 $\sigma_y \sim 8$ -10 mm 程度である。各ステーション上で計測されたビームサイズの例を表 6.2 にまとめた。

第 6 章 COMPASS 実験用 SCIFI トラッカーの建設と性能評価

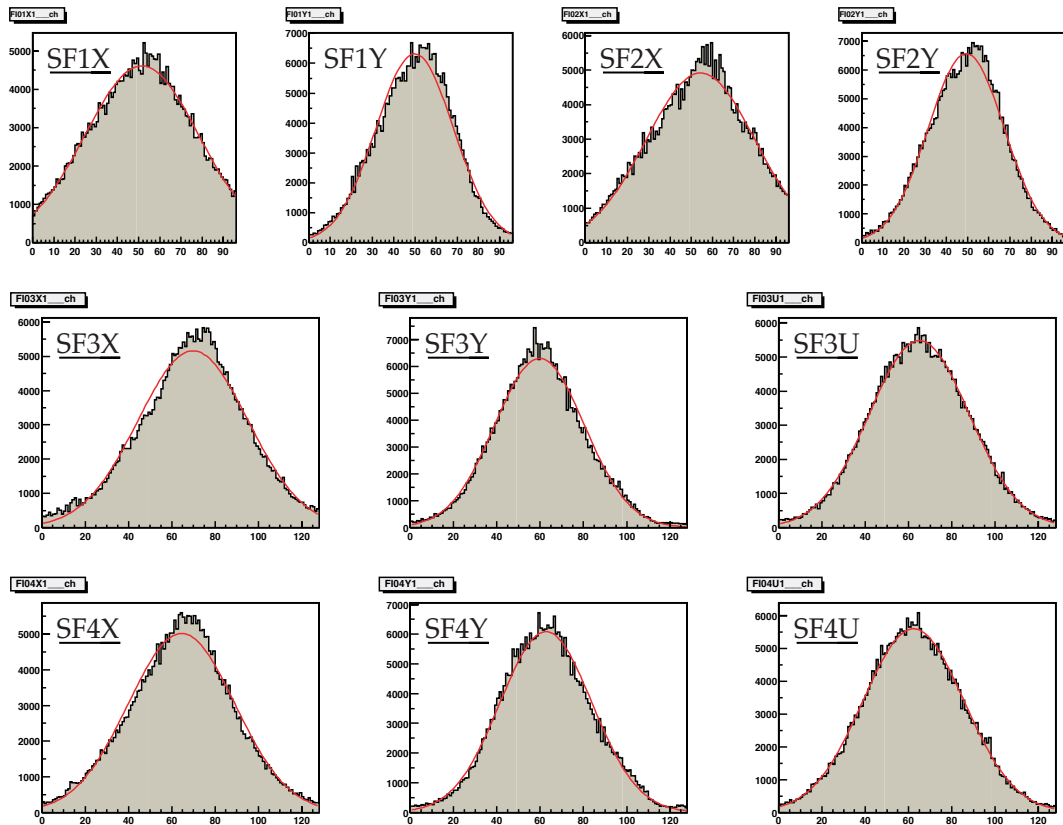


図 6.18: 全 10 ステーションから得られた高強度ミュオンビームのプロファイル。

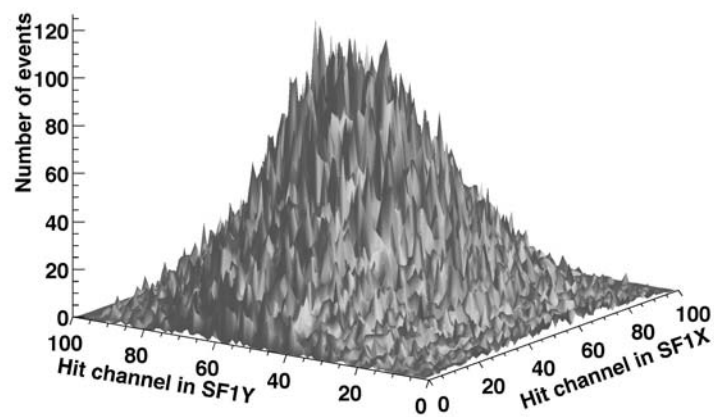


図 6.19: SF1XY プレーンを用いて得られた 2 次元ビームプロファイル。

表 6.2: 各ステーションの標的中心からの距離 (Z-position) と、ステーション上のビームサイズの例。

Station	Z-position	$\sigma_x(\text{mm})$	$\sigma_y(\text{mm})$
SF1	-7.4	10.7	7.8
SF2	-3.0	10.0	7.8
SF3	1.2	9.8	9.1
SF4	2.1	10.3	9.8

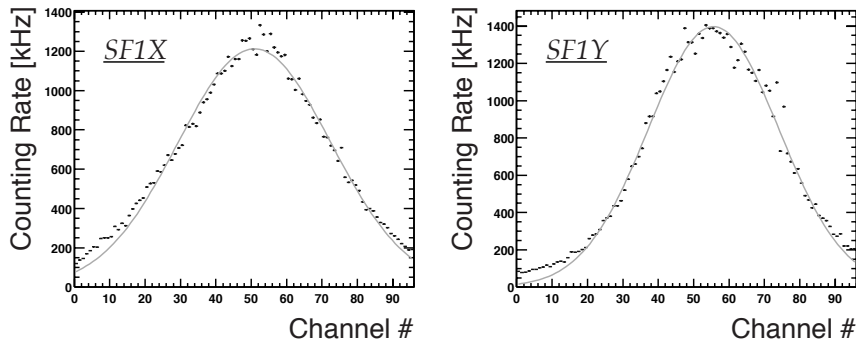


図 6.20: SF1XY プレーン各チャンネルの計数率。

単一プレーンでのプロファイル測定だけでなく、各ステーションの X、Y の 2 プレーンで計測された時間的に相関のある飛跡から、図 6.19 のような 2 次元のプロファイルを得ることもできる。

計測されたイベント数を単純にカウントするだけでなく、ランダムトリガーにより開いたタイムウィンドウ中のイベントごとの平均カウント数から、各チャンネルでの計数率を見積もることができる。図 6.20 に示したプロファイルはこのようにして得られたものである。これは 2000 年のテストランで 1.5×10^8 muons/spill(2.4s) の条件で得た計数率である。計数率は中心のチャンネルで最大となり約 1.4MHz であった。

SciFi ステーションを使用することで、標的前後でのビームの形状や、ダイバージェンスの情報を得ることができる。COMPASS 実験ではこれら 4 台の SciFi トラッカーを利用してビームのチューニングを行った。このチューニングでは、標的中でのビームの形状だけでなく、ダイバージェンスに注意を払わなければならない。COMPASS のスペクトロメーターは最下流まで約 50 m と非常に長く、ビームの傾きが大きいと下流側でスポットサイズが大きくなり、下流側の検出器が動作しなくなるだけでなく、ビーム粒子と散乱ミューオンとの分離が悪くなれば、収集データに多くのバックグラウンドが含まれてしまう。

図 6.21 に、SF1 と SF2 のテレスコープで測定したビームの飛跡の傾きの分布を示す。最適なチューニングの結果、X、Y 方向のダイバージェンス σ_{divX} 、 σ_{divY} として、それぞれ

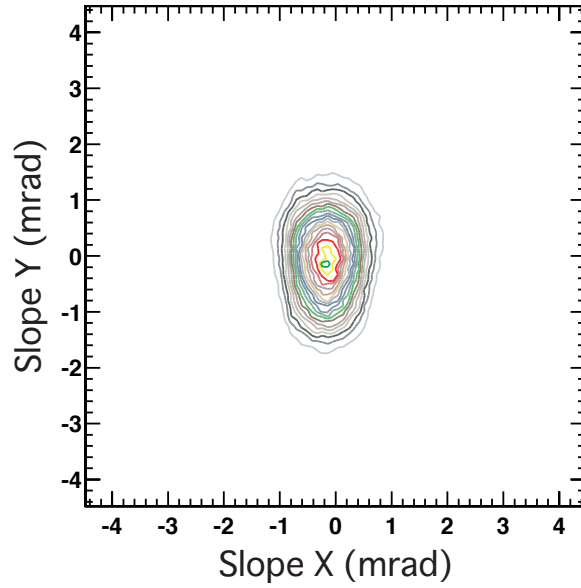


図 6.21: SF1 と SF2 の望遠鏡で測定したビームトラックの傾きの分布。分布の幅がビームのダイバージェンスを示す。

$\sigma_{divX} \sim 0.41 \text{ mrad}$ 、 $\sigma_{divY} \sim 0.68 \text{ mrad}$ が得られた。このように、標的前後の SciFi ステーションは、実験から要求されるビームの条件を決定する上でも重要な役割を果たした。

6.2.3 SciFi トラッカーによる飛跡の再構成

2 台以上の SciFi トラッカー・ステーションを使用することで、単純な飛跡の再構成を行うことができる。これにより、SciFi トラッカーで測定したデータのみを使用して、位置分解能、マルチプリシティ分布、局所的な検出効率等の検出器の性能評価を行った。ここではまず、各検出器プレーンで検出された飛跡の再構成において同時性の決定に必要な、時間スケールの原点 (T_0) の較正法について述べた後で、これを利用した位置分解能の測定結果を示す。

時間原点 (T_0) 較正

飛跡の再構成においては、同一の粒子が複数の検出器プレーンを通過したときに、各プレーンで検出される飛跡の関連づけを行う必要がある。この関連づけには時間情報を用い、その同時性により決定するのが最も単純である。SciFi トラッカーのように計数率が高い場合、同時性を精度よく決定することが重要である。

SciFi トラッカーの出力信号は PSC を通して TDC に送られ、時間測定が行われる。TDC

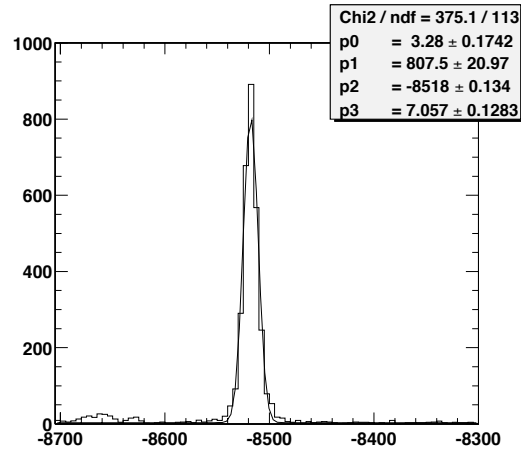


図 6.22: SF2X プレーンの第 48 チャンネルとトリガー信号との時間差スペクトル。

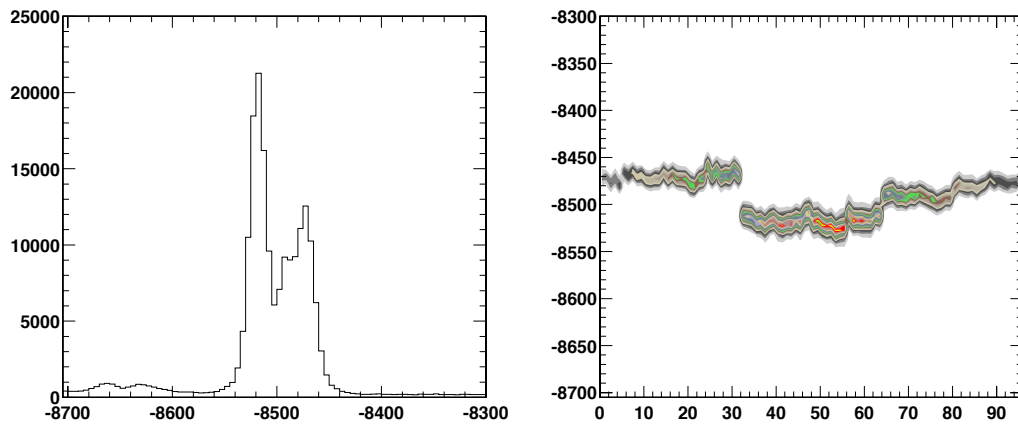


図 6.23: SF2X プレーンとトリガー信号との時間差スペクトル。右は各チャンネルごとの時間差。

に記録される時間をそのままプロットすると、水平な分布を示す。なぜならば、TDC はある時間スケールでの信号到達時間を記録するだけだからである。この時間スケールは、イベントレートに比較して十分に速い周期で頻繁に折り返される。この折り返しのレートは、TDC のダイナミックレンジによって決まる。COMPASS の設定ではこのレンジは 64240 ビンであり、これは $8.28 \mu\text{s}$ に相当し、ビン幅は 128.92 ps である。

TDC の出力は、各イベント中のある時点をもととした時間スケールに投影したときにはじめて意味を持つ。COMPASS では、トリガー信号が生成された時間をこの原点とする。すなわち、TDC のデータはまず第一次的にこのトリガー時間 (t_{Trig}) との差に変換される。

トリガー事象に起因する飛跡が検出されたとき、各チャンネルの出力信号はこのトリガー時間に対して固有の時間差を持って記録される。この時間差は、各検出器とトリガーホドスコープとの空間的な距離による TOF、それぞれの信号生成時間、および TDC までの伝達時間等により決定する一定の値となる。すなわち、各チャンネルで記録される時間を t_{Hit} 、トリガー時間を t_{Trig} とすれば、 $t_{Hit} - T_{Trig} = const.$ である。実際にはこれは δ 関数的でなく、図 6.22 に示すように検出器の各チャンネルに固有の時間分解能、トリガー信号の時間分解能を含む幅を持って分布する。

同ステーションでは各チャンネルからの出力信号はほぼ同時に TDC に到達するが、厳密に見るとかなりばらつきがある。最も大きなばらつきを与えるのはフラットケーブルであることがわかっており、長さ 10 m のケーブルでツイストペアの各チャンネルごとに最大 2 ~ 3 ns のばらつきを与える。したがって、例えばいくつかのチャンネルに完全に同時に光信号が生成されたとしても、トリガー信号との時間差はチャンネルごとに異なる。図 6.23 は、とくに大きなばらつきを示す SF2X プレーンの各チャンネルから得られた信号のトリガー信号との時間差分布である。1 チャンネルごとの細かいばらつきだけでなく、16 チャンネル、32 チャンネル単位でのタイミングの大幅なシフトが見られる。これによって、全チャンネルの和をとった左の図では、ピークが 2 つあるように見えてしまっている。

こうしたチャンネルごとのタイミングのばらつきを補正しなければ、精密なイベントの同時性の同定ができない。ここで、各チャンネルに対して $T_0 = t_{Hit} - T_{Trig}$ を定義し、以下のような新たな時間スケール T_{Digit} を定義する。

$$t_{Digit} = t_{Hit} - t_{Trig} - T_0(channel)$$

この時間スケールでは、実際に信号が検出される時間差によらず、トリガーに相関のある飛跡はあらゆる検出器プレーンのチャンネルで時間 0 (の周辺) に検出される。このような時間スケールを用いて、同時性の決定を行う。

実際には、較正を行う各チャンネルとトリガーとの時間差分布を測定し、ピークの中央値を T_0 とする。このピークはガウス分布に従うが、計数率が高い場合は一定のバックグラウンドの上にこのピークが見える形になるので、このピークを $Gaussian + const.$ の関数でフィットし、ガウス分布関数の中央値を T_0 とする。

このとき T_0 の決定のためには十分な統計が必要であるが、各プレーンの端のチャンネルは場合によってはトリガーとの同時計数が非常に少ない。そこで、実際には以下のような手順で T_0 較正を行った。

- (1) トリガーとの同時計数が十分にある X(Y) プレーンの中心付近 40 チャンネルについて T_0 を決定

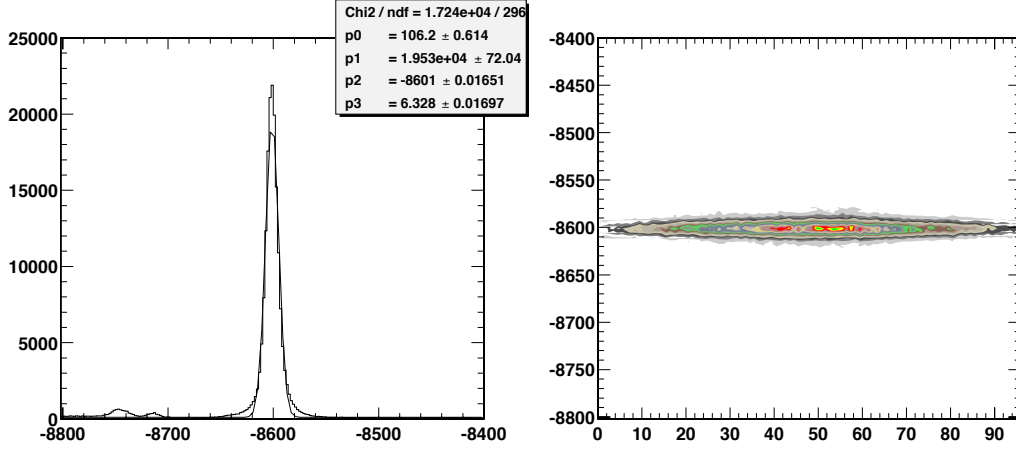


図 6.24: T_0 較正後の SF2X プレーンとトリガー信号との時間差スペクトル。右は各チャンネルごとの時間差。

- (2) 較正した X(Y) プレーンの中心付近のチャンネルとの時間差により、同じステーションの Y(X) プレーンを較正

たとえば、X プレーンのあるチャンネルに対して $T_0(channel_X)$ を決定すれば、

$$t_{Trig} = t_{Hit_X} - T_0(channel_X)$$

であるから、

$$T_0(channel_Y) = t_{Hit_Y} - t_{Trig} = t_{Hit_Y} - t_{Hit_X} + T_0(channel_X)$$

であり、 t_{Hit_X} との時間差を用いても較正が可能である。各ステーションの X、Y プレーンの有感領域はほぼ完全に重なっているので、一方のプレーンを通じた粒子の殆どは他方のプレーンを通ずる。これならば、トリガーと関係のないすべてのビーム粒子の飛跡を用いてより多くの統計を得ることができる。

図 6.24 に、このようにして T_0 較正を行った後の、前出の SF2X プレーンとトリガー時間との時間差分布を示す。各チャンネルごとのタイミングのばらつきが補正され、ピークが一直線に並んでいるのがわかる。これで、精度よく同時性の決定ができる。なお、ここでは便宜上 $t_{Digit} = -8600$ に原点をとっている。時間スケールは、TDC ビンを単位としている。

計数率の高い条件でも原理的に同じ方法で T_0 較正は可能であるが、バックグラウンドのレベルが上がると精度が出ない。一方で、 T_0 は主として検出器の位置、ケーブルの長さ等の計数率や時間によっては変化しない要因によって決定するのでセットアップを保持

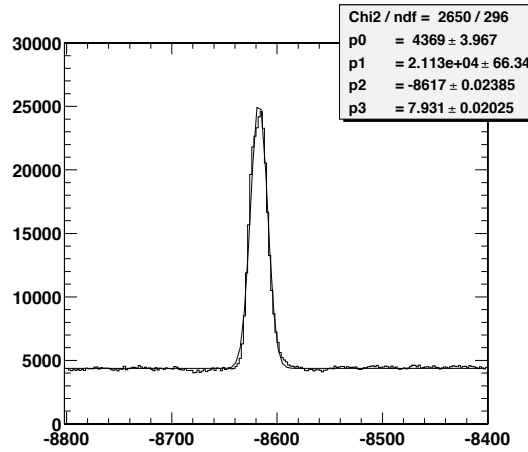


図 6.25: 低強度ビームで較正した T_0 を用いた場合の高強度での SF2X プレーンとトリガー信号との時間差スペクトル。

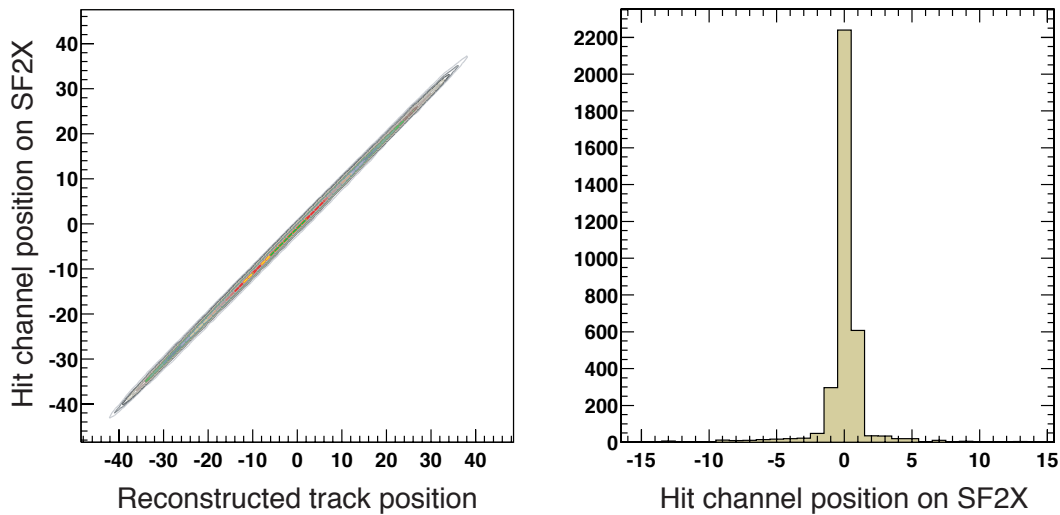


図 6.26: 再構成された飛跡位置と実際の検出チャンネルの相関図。

すればほぼ一定の値に保たれる。したがって、ここでは 1 週間に 1 回の割合で行われる低いビーム強度でのランのデータを用いて T_0 較正を行い、同じ値を高計数率時に使用した。図 6.25 に、上記の T_0 の値を使用した 2×10^8 muons/spill(5.2s) での t_{Digit} の分布を示す。

位置分解能

図 6.26 に、飛跡の再構成を行った結果の例を示す。図 6.26 の左の図は、SF1X プレーンと SF4X プレーンのテレスコープにより再構成された飛跡の SF2X プレーン上で予想され

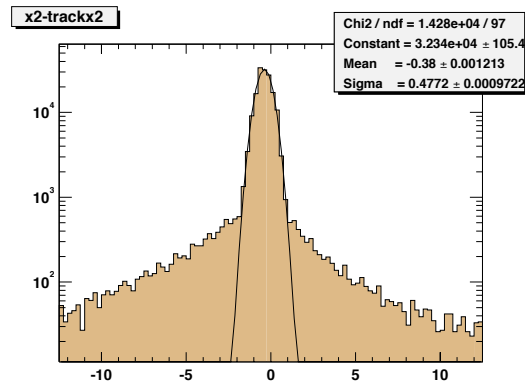


図 6.27: 再構成された飛跡位置と実際の検出位置の距離分布。

る入射位置の X 座標と、実際に SF2X プレーン上で飛跡が検出されたチャンネルの X 座標との相関図である。飛跡の再構成を単純にするために、SF1 と SF4 で単一の飛跡が検出されたイベントのみを抽出した。図 6.26 の右の図は、再構成された飛跡の入射位置 $X = 0$ のビンに対して、相関図を Y 軸に投影したものである。この図から、再構成された入射位置を中心とした 3 チャンネル中に殆どのイベントが検出されているのがわかる。

図 6.27 は、全プレーンにわたって、実際の入射位置と再構成された飛跡位置との距離に対してイベント分布をプロットしたものである。この分布の幅は、関係する 3 台の検出器の位置分解能の情報を含んでいる。各 SciFi ステーションで位置分解能は等しいと仮定して、単純なフィットと計算から約 $160 \mu\text{m}$ (rms) が得られた。

SF2 と SF3 ステーションの間には厚い標的物質があり、この分布の幅は標的物質中の多重散乱による影響も含んでいる。ビーム軸上の全標的システムの物質量は放射長の 1 倍程度であり、この多重散乱は標準偏差 (rms) で約 0.1 mrad である。このとき多重散乱によって、SF2X 上での飛跡の再構成に与えられる誤差は約 0.1 mm (rms) 程度になる。これを考慮すると位置分解能は $130 \mu\text{m}$ 程度と計算され、 $0.41 \text{ mm} / \sqrt{12} \sim 120 \mu\text{m}$ で与えられる理想的な位置分解能に近い値が得られていることが確認できた。

6.2.4 検出効率とマルチプリシティ

飛跡の再構成により、各検出器プレーン上の、粒子の入射位置に対する局所的な検出効率を調べることができる。

図 6.28 に、SF2 の X、Y プレーンの検出効率と、ヒットマルチプリシティ分布を示した。この測定は $7 \times 10^7 \text{ muons/spil}(5.2\text{s})$ のビーム強度で行った。また、このとき各 PSC-PSPM モジュールの閾電圧は、プレチューンで設定した値を使用した / 飛跡の再構成には SF2 以

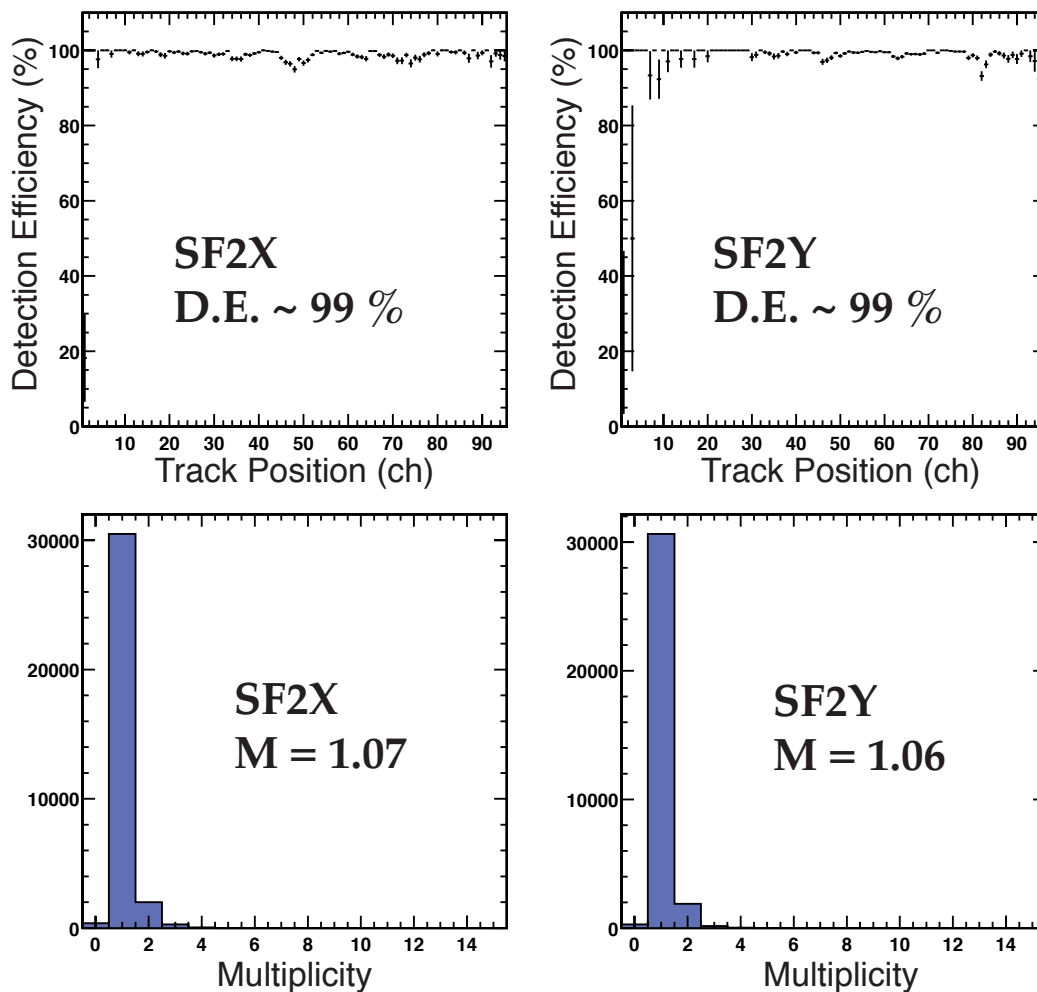


図 6.28: SF2X、Y プレーンの検出効率とヒットマルチプリシティ分布。 7×10^7 muons/spil(5.2s) のビーム粒子で測定。

外の 3 ステーションを使用し、これらのプレーン上で単一ヒットのイベントを抽出した。検出効率は再構成された入射位置に対して、対応するチャンネルを中心とした周辺 5 チャンネル以内に時間的に相関のあるイベントが計測される確率 (1 対 5 検出効率) として計算した。この測定の結果、両端の数チャンネルでは統計が少ないため正確な評価ができないが、これらを除いた平均値として各プレーンで 99% 以上の検出効率を得られた。マルチプリシティは 1.06 ~ 1.07 であった。この結果は、プレチューニングしたモジュールを実機に装着した場合、チューニングで設定したのと同等の性能が得られることを示している。SF1 についても同様の結果が得られた。

一方で、ターゲット・ステーションではプレチューンした閾電圧の場合、検出効率は全

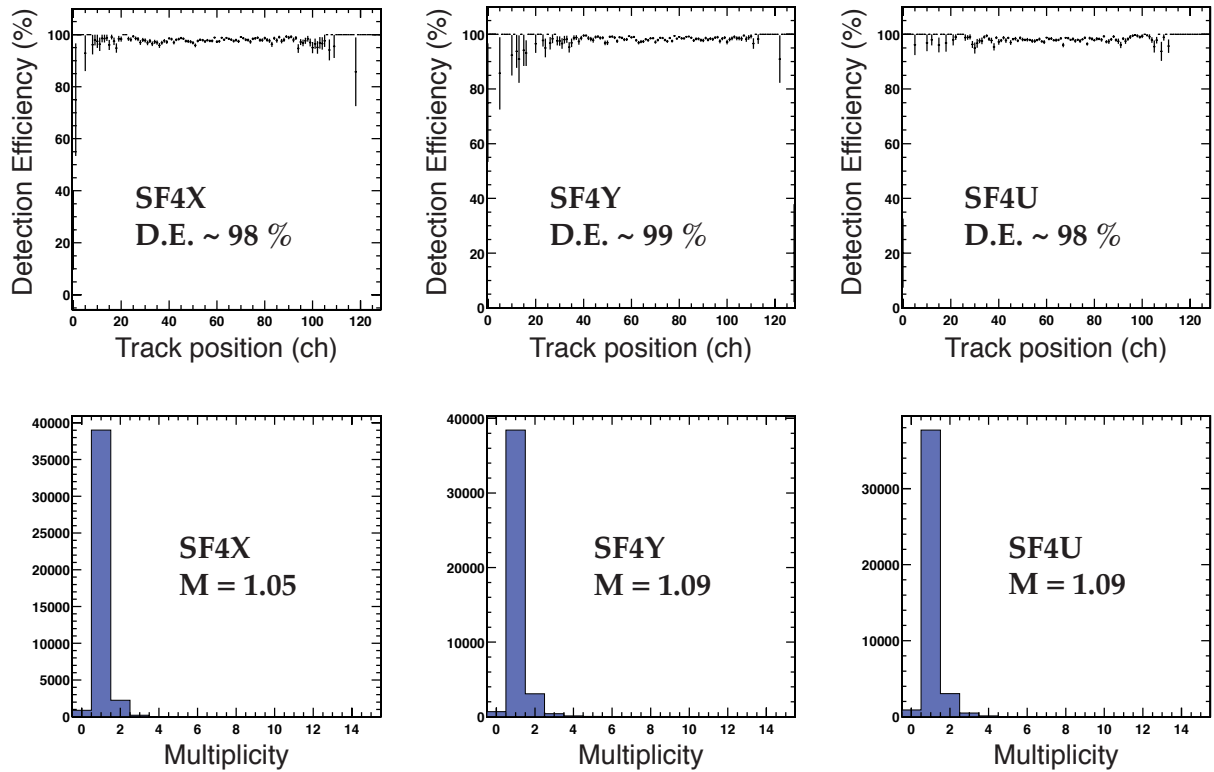


図 6.29: SF4 の検出効率とヒットマルチプリシティ分布。

体的にやや低い値 ($\sim 95\%$) が得られた。これは、プレチューニングで使用したバンドルよりも実機で得られる光量が少ないことを示していると考えられる。そこで、実機に装着した各 PSC-PSPM モジュールを、実際のビームを使って再度チューニングした。

このチューニングでは簡単のため、以下の方法による近接トラッキングを使用した。SF3 と SF4 は 3 プレーンあるので、このうちの 2 プレーンで飛跡が検出されたファイバー・コラムの交点から飛跡位置の XY 座標を決定することができ、残りのプレーン上での入射位置を推定することができる。このような近接トラッキングにより測定した各入射チャンネルに対する検出効率と、マルチプリシティ分布の測定に基づいて、プレチューニングと同様に各プレーンのチューニングを行った。図 6.29 に、再チューニング後に得られた SF4 ステーションの各プレーンの検出効率とマルチプリシティ分布を示す。再チューニングにより、SF3、SF4 ステーションの各プレーンで、約 98% の検出効率と平均マルチプリシティ 1.1 以下を得た。

図 6.30 に、2002 年のランで測定した全 10 プレーンの検出効率を示す。このプロットでは、再構成された飛跡の入射位置の XY 座標に対して、各プレーン上の検出効率をプロットしたものである。このプロットは、 2×10^8 muons/spill(5.2s) の大強度ビームを使用

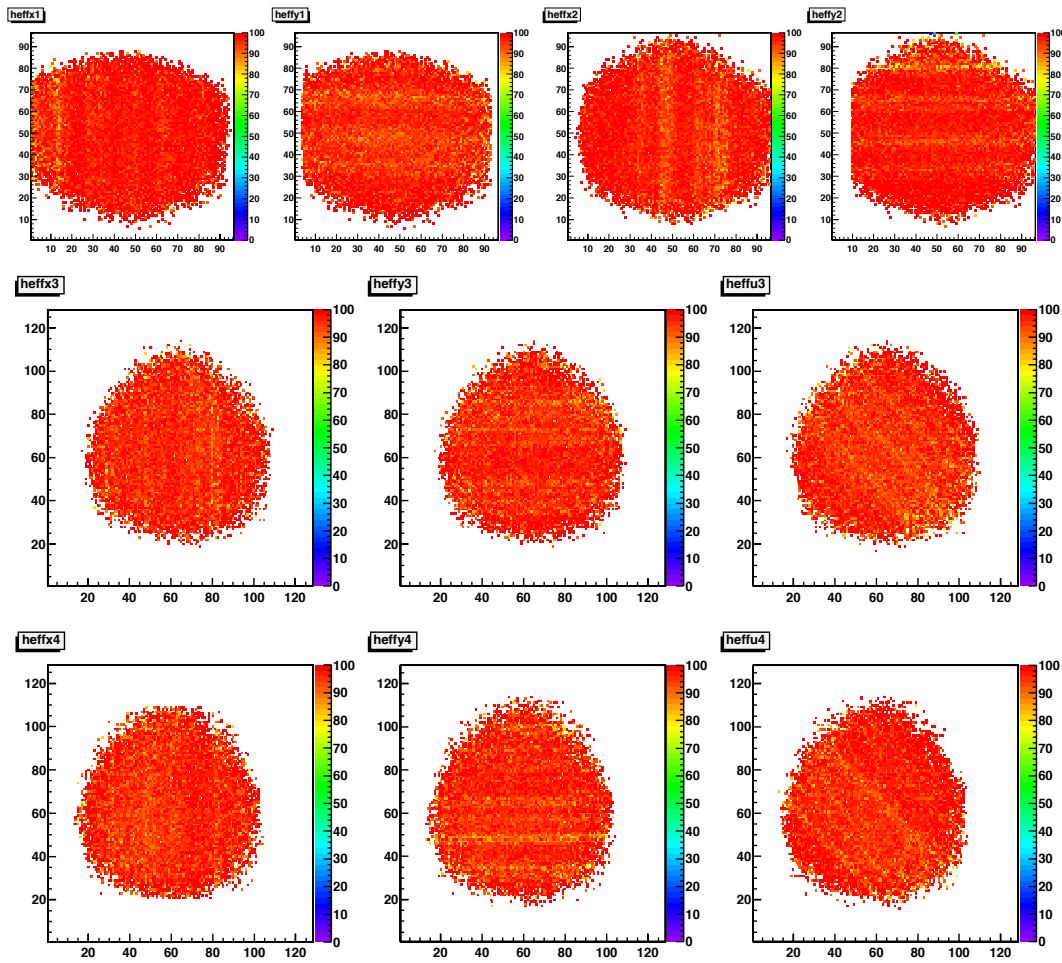


図 6.30: 全 10 プレーンの検出効率。ビーム軸と直交する xy 座標上の粒子の入射位置の関数としてプロット。

した 2002 年の本実験の測定で収集したデータの解析により得られたものである。大強度ビームを使用した場合、偶然同時計数によるバックグラウンドの増加により SciFi トラッカーのみを用いた単純な飛跡の再構成では厳密な飛跡の決定は難しい。また、2 次元でプロットしたため、各点での統計は十分ではないが、各プロットで薄く筋のように見えているのは、周囲に比べてやや検出効率の低いファイバー・チャンネルである。この解析では各プレーンから 96% 程度の検出効率得られ、このときのマルチプリシティは 1.1 以下であった。

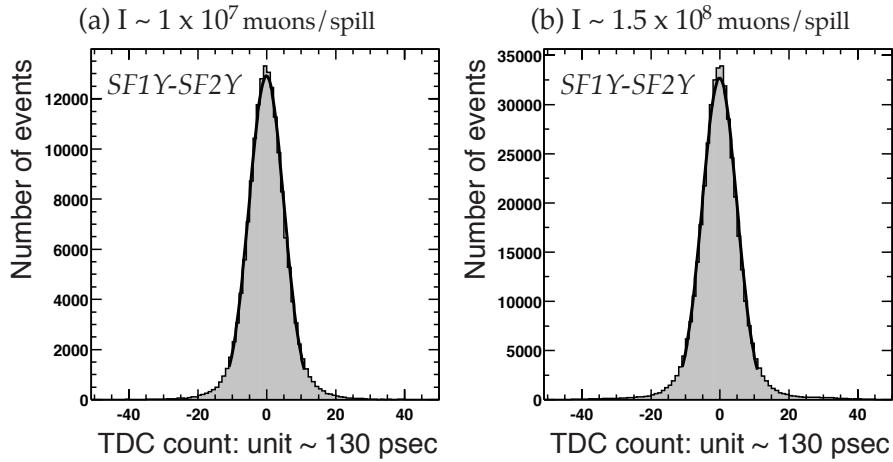


図 6.31: SF1 と SF2 の間の飛跡の時間差分布。(a) 1×10^7 muons/spill、(b) 1.5×10^8 muons/spill で測定。

6.2.5 時間分解能

図 6.31 に示したヒストグラムは、 T_0 較正後 SF1 と SF2 の各 X プレーンで計測された飛跡の時間差をプロットしたものである。横軸の単位は F1-TDC のビン幅約 130 ps である。それぞれ (a) 1×10^7 muons/spill、(b) 1.5×10^8 muons/spill で測定を行った。これは 2000 年のランで得られた結果で、このときのスピルの間隔は 2.4 s である。

この分布の幅を $\sqrt{2}$ で割ることにより、各プレーンの平均時間分解能を見積もることができる。(a)、(b) どちらの場合についても、約 500 ps (rms) の時間分解能が得られた。この値は、COMPASS のデータ収集システムの時間測定精度、 T_0 較正の精度等を含むシステム全体としての時間分解能とみなすことができる。開発研究では、ビームホドスコープ・ステーションと同等の仕様の試作機で高計数率時に 400 ps (rms) 以下の時間分解能が得られており、それと比較するとやや分解能が低くなっている。しかし、この結果はシステム全体としての時間分解能が計数率によらず安定であることを示し、実際の使用条件で COMPASS の要求をほぼ満たす結果が得られたと言ってよい。

図 6.32 に SF2 と SF4 について、それぞれの X、Y プレーン間の時間差分布を測定した結果を示す。この結果は 2×10^8 muons/spill (5.2s) の大強度ビーム入射で行った 2002 年の測定で得られたものである。SF2、SF4 のそれぞれについて約 500 ps、700 ps の時間分解能が得られた。SF2 については、図 6.31 に示した結果と同様な結果が得られた。SF4 では長いライトガイドの影響により、時間分解能が低下しているのがわかる。SF3 についても同様の結果が得られている。ターゲットステーションについては各 3 プレーンを持っており、偶然同時計数があってもステレオアンビギュイティを排除できる。また、下流からの

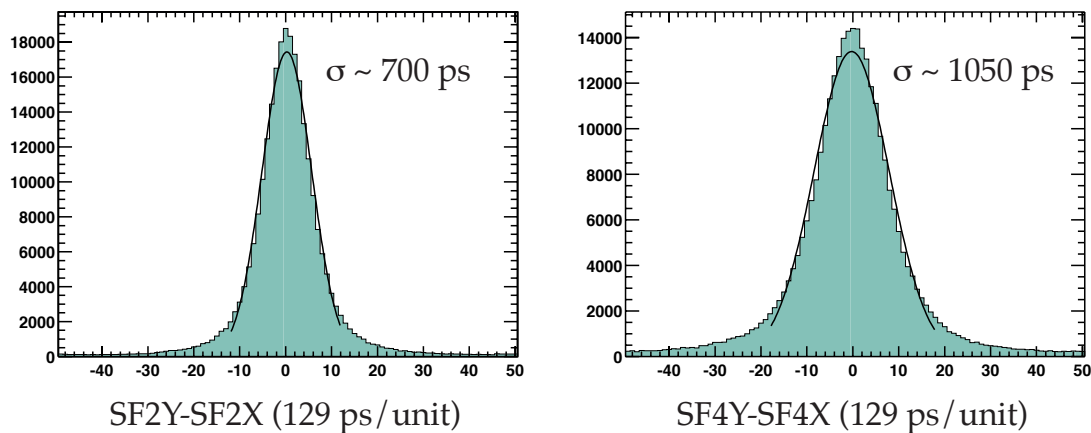


図 6.32: SF2(左) と SF4(右) の時間分解能の測定結果。

トラッキングによりある程度空間情報を用いた飛跡の特定が可能であることなどから、この時間分解能でも十分に COMPASS の要求を満たす。

6.2.6 まとめ ～ 物理データ解析での使用 ～

私が担当した COMPASS 実験用 SciFi トラッカーのビームホドスコープ・ステーションとターゲット・ステーションの 4 台、全 10 プレーンの全チャンネルを COMPASS の実験条件で使用し、ほぼ所期の性能が得られた。オープンチャームイベントを捕らえるために、入射、散乱ミューオンの飛跡測定において本質的に重要な役割を担う SciFi トラッカー系が高性能で安定に使用されたことで、グルーオン偏極度測定に必要なデータ収集を順調に進めることができた。

現在すでに 2002 年までの測定で収集したデータの解析が行われており、これら 4 台の SciFi ステーションで測定したデータはビームの再構成、スペクトロメーター中でのイベントの再構成の両方で使用されている。SciFi トラッカーを用いたデータ解析、特にビーム粒子の再構成において実際に BMS と SciFi トラッカーの両方を使用して得られた結果について、Hodenberg[82] に詳しく記述されている。

グルーオン偏極に関する第一次的な結果を導出するにはさらに 2003 年のランにおけるデータ収集が必要であるが、SciFi トラッカー系を含めた高性能の測定系によって順調なデータ収集が行われ、近い将来に物理的な結果が得られることは間違いない。

第7章

結論と今後の展望

COMPASS では、大強度偏極ミューオンビームと偏極核子標的との深非弾性散乱によるオープンチャーム生成の断面積のスピンの非対称度を主なプローブとして、核子内グルーオン偏極度 $\Delta G/G$ を測定し、核子スピンに対するグルーオンスピンの寄与を調べる。

オープンチャームの同定に必要な測定系には、前方に散乱されるミューオンを捕らえると同時にオープンチャームにより生成される $D^0(\bar{D}^0)$ の崩壊で放出される K 、 π を捕らえることが要求される。特にミューオンに注目すれば、入射、散乱ミューオンの運動量、入射角度を押さえることが必要となる。特に、オープンチャームにおいてはミューオンが最前方 ($Q^2 \approx 0$) に散乱されるイベントが支配的であり、これを捕らえることが高い統計を得るために本質的に重要である。断面積の小さなオープンチャームを調べるためには高いルミノシティを得ることが不可欠であり、COMPASS では 2×10^8 muons/spill(5.2s) という大強度ビームを使用する。したがって、測定系にはこの大強度ビームを直接入射し、飛跡測定が可能な検出器の存在が不可欠である。

このための検出器には以下のような性能が要求される。

- (1) 2×10^8 muons/spill の大強度ビーム入射による、最大で約 10^7 particles/cm²·s のビームフラックスに対応できる高計数率耐性。
- (2) 最大で 100 MHz 程度の高バックグラウンド環境でトリガーイベントに関与した入射、散乱ミューオンを識別するための 400 ps (rms) 以下の高い時間分解能。
- (3) 200 μ m (rms) 以下の位置分解能。
- (4) 高い検出効率と低いヒットマルチプリシティ(≈ 1) を同時に満たす、高い飛跡位置測定性能。

これらを満たす飛跡測定器として、位置感応型光電子増倍管 (PSPM) 読み出しによるシンチレーティングファイバー (SciFi) トラッカーを選択し、この開発研究を行った。

位置感应型光電子増倍管を用いた高時間分解能、高計数率型シンチレーティングファイバー・トラッカーの開発研究

使用するファイバーの種類、ファイバー・バンドルの構造等の異なる試作機の製作、およびテストビームによる性能評価をくり返し、最終的にマルチクラッド型ファイバー、クラレ SCSF-78MJ を使用した3種類の試作機のテストで、以下の成果が得られた。

7 レイヤー構造の H7、13 レイヤー構造の H13 で、それぞれ ~ 300 ps (rms)、 ~ 280 ps (rms) の高い時間分解能を、97%以上の高い検出効率と約 1.1 の低いマルチプリシティ、所期の位置分解能約 $125\ \mu\text{m}$ と共に得た。この性能は、COMPASS の要求を十分に満たす。光電子増倍管の光電面で得られる光電子数は H7 と H13 で大きな違いが得られたが、同等の飛跡位置決定性能を要求した条件では、時間分解能に大きな違いは得られなかった。実際の検出器製作の観点からすれば、レイヤー数が少ない方が、信頼性の高い検出器の製作を容易に行うことができる。そこで我々は、COMPASS 用 SciFi トラッカーに7レイヤー構造を選択した。

長さ 3 m のライトガイドを装着した試作機のテストの結果、時間分解能では 540 ps (rms) を得た。これは COMPASS の要求をほぼ満たす時間分解能であるが、長いライトガイド中での光の減衰と広がりによって時間分解能に大きな影響が出ることがわかった。飛跡位置決定精度、検出効率は十分に高い値が得られるが、特に高い時間分解能を実現するためにはライトガイドの長さをできる限り短くすることが重要である。

7 レイヤーの試作機に実際に COMPASS で使用する大強度ミュオンビームを入射して高計数率での性能評価を行った。チャンネルあたりの計数率が約 3 MHz という過酷な条件の元でも、時間分解能、位置分解能、検出効率等の検出器の基本性能は低い計数率の場合と殆ど変化せず、計数率によらず安定であることが示された。計数率を変えて測定した信号波高分布から、最終4段のダイノードにブースターを使用した試作機の条件で、上記計数率まで PSPM から安定な出力が得られることが確認された。時間分解能は、 1.4×10^8 muons/spill の大強度ビーム入射時で、400 ps (rms) 以下の結果を得た。

これらの試作機によるテストの結果は、COMPASS だけでなく、様々な実験で要請され得る極端な高計数率環境での比較的高い精度での飛跡位置測定器として、SciFi トラッカーが非常に魅力のあるデバイスであることを示している。

COMPASS 実験用シンチレーティングファイバー・トラッカー実機の建設と物理データ収集での使用

試作機による開発研究の成果を受けて、2000 年から 2001 年にかけて COMPASS 実験用 SciFi トラッカーステーションの実機の建設を行った。2000 年にまず2台のビームホドスコープ・ステーション (SF1、SF2) を建設し、実験エリアに設置して COMPASS のテス

ト実験で使用した。この測定で、実際に COMPASS ミューオンプログラムで使用される大強度ビームを入射し、ほぼ所期の性能を確認した。2001 年はじめに 2 台のターゲット・ステーション (SF3、SF4) の建設を完了し、2001 年に COMPASS としてはじめて行われた物理データ収集から、2002 年に本格的に開始されたグルーオン偏極度測定の本実験でのデータ収集に、全 4 ステーション、10 プレーンの 1,152 チャンネルが安定に使用された。

実験中の測定データの解析により、実際の測定条件での SciFi トラッカーの基本性能の評価を行い、マルチプリシティ 1.1 以下、検出効率 95% 以上で時間分解能 500 ps (rms; ビームホドスコープ・ステーション) および 700 ps (rms; ターゲット・ステーション)、位置分解能 $\sim 130 \mu\text{m}$ (rms) の性能を得た。

上記性能で SciFi トラッカーが安定に使用されたことで、特に 2002 年のデータ収集において、グルーオン偏極度の決定に必要なデータがかなりの統計で得られた。物理のデータ収集以外にも、SciFi トラッカーは実験において様々な貢献を果たした。特にビームホドスコープステーションは、データ収集に必要なビームの形状、ダイバージェンス等を決定するビーム調整において、本質的な役割を担った。また、これらのステーションは VETO としてトリガーにも組み込まれ、収集データの質の向上に貢献した。入射ビームをトラッキングする唯一の検出器であるという性質により、データ解析における飛跡測定器群のアラインメントの基準としても使用された。また、様々な検出器の性能評価などにも利用され、実験装置の準備の最終段階においては、特に DAQ システムやオフライン解析プログラムの実際のデータを使用した最終テストにおいても大きく貢献した。

COMPASS では引き続きデータ収集が行われ、2002 年に得られたデータと 2003 年に収集するデータとを合わせて解析を行い、グルーオン偏極度測定の第一次的な結果が得られると見込まれる。COMPASS は、第 1 期として 2004 年までの測定が決定しており、ここまでの測定で、核子スピンに対するグルーオンスピンの寄与の解明に大きく前進することが期待できる。また、第 2 期として 2010 年まで実験が継続されることが CERN において承認されている。

SciFi トラッカーは今後の測定でも継続してデータ収集に使用される。今後、長期間の使用による放射線損傷で性能が低下することも考えられ、継続的に性能評価を行っていくとともに、最適な調整を行って性能の維持に取り組んでいくことが重要である。

謝辞

本研究は私一人の力でなし得たものではなく、多くの研究者との共同研究、様々な方からのご助言、ご助力によってはじめてやり遂げることができたのだということを、その成果をこうして論文にまとめるにあたって、いまさらながらに実感しています。この場をお借りして、お世話になった全ての方々に心から感謝の意を表したいと思います。皆様本当にありがとうございました。

堀川直顕教授、長谷川武夫教授には、研究について直接ご指導いただいたばかりでなく、COMPASS 日本グループのグループリーダーとして CERN での共同研究の環境作りにご尽力くださったこと、そして、長期間に及ぶ CERN での研究活動のチャンスを私に与えてくださったことに、心から感謝いたします。特に、指導教官をしていただいた堀川教授の長きにわたる叱咤激励なくしては、この論文は到底完成し得なかったと思います。本当にありがとうございました。岩田高広助教授、松田達郎助教授、大東出博士、石元茂博士、宮地義之博士からも COMPASS 日本グループのスタッフとして様々なご指導、ご協力をいただきました。福井崇時名誉教授、森邦和教授にも、大学においてご指導いただきました。また、研究室秘書の清水志緒里さんのご助力がなければ、海外での快適な研究活動を維持することはできませんでした。皆様に心から感謝いたします。

黒田啓一博士には、SciFi トラッカーの試作機および実機の設計、製作から投稿論文の執筆に至るまで、懇切なご指導をいただきました。CERN においては、黒田博士をはじめ、ロシア IHEP グループの A. Gorin 氏、I. Manuilov 氏、A. Riazantsev 氏、A. Sidorov 氏との共同研究により、研究活動を遂行することができました。Gorin 氏、Manuilov 氏、Riazantsev 氏、Sidorov 氏からも貴重なご助言、ご指導をいただきました。本当にありがとうございました。また、J. Gontcharenko 氏、A. Koulemzine 氏、V. Oboudovski 氏、K. Katchnov 氏、V. Poliakov 氏をはじめ、ロシアグループの多くの共同研究者にご協力いただきました。DIRAC 日本グループの竹内富士雄教授、岡田憲志教授、牧孝教授には、試作機のテスト実験においてご指導いただきました。ありがとうございました。

私は、1999 年から COMPASS 国際共同実験グループの一員として実験に参加してきました。その間、共に実験に貢献した全ての共同研究者に、現在までの成果に対して賞賛を送るとともに、心からの敬意と感謝を表します。F. Bradamante 教授、S. Paul 教授には、

グループ成立時より一貫して、スポークスパーソンとして大きな研究グループを牽引してこられたことに、深く感謝いたします。実験装置の建設、実験の遂行において中心となってお活躍されているテクニカルコーディネーターの G. Mallot 博士には、SciFi トラックの建設、スペクトロメーターへの設置において、たいへんお世話になりました。SciFi スペクトロメーター・ステーションの建設を担当された Bonn 大学、Erlangen 大学グループの J. Bisplinghoff 教授、W. Eyrich 教授、R. Ziegler 博士、F. Stinzing 博士、R. Joosten 博士、A. Teufel 博士、O. Nahle 氏、R. Webb 氏には、SciFi の開発研究の段階から数々の貴重な議論をさせていただいたことに深く感謝するとともに、スペクトロメーター・ステーションの建設の成功に敬意を表したいと思います。また、COMPASS 実験用 SciFi トラック実機の設置において、A. Magnon 博士、C. Marchand 博士、J. Pretz 博士、E. Weise 博士、J. M. Demolis 氏、V. Pesaro 氏に様々なご協力をいただきました。データの読み出しおよび解析においては、特に L. Schmitt 博士、H. Fischer 博士、F. H. Heinsius 博士、A. Grunemaier 氏に多くのご助言、ご協力をいただきました。COMPASS の共同研究者の皆様、本当にありがとうございました。

名古屋大学物理金工室の香月真澄氏、井上晶次氏、中村洋子氏にはファイバー・バンドル製作に不可欠な治具の製作をしていただいたことに、厚く御礼申し上げます。また、浜松ホトニクスの中村俊一氏、クラレの矢倉和紀氏には、光電子増倍管、ファイバー購入に関してたいへんお世話になりました。

CERN での生活は、研究仲間でもある J. Koivuniemi 博士、P. Fauland 氏、F. Gautheron 博士、K. Gustafsson 博士、M. Leberig 博士、A. Bravar 博士ら友人達と過ごした時間によって、とても楽しく、有意義なものとなりました。心から感謝したいと思います。

共に CERN に滞在し、研究活動を行った研究室の仲間である戸枝武明氏、高林直生氏、堂下典弘氏には、公私にわたって本当にお世話になりました。若井篤志博士、長谷川勝一氏をはじめとする研究室の友人、先輩方にも、様々なご協力に対し感謝の意を表したいと思います。特に、鳥光悟氏には CERN において、SciFi トラックの検出器ハウジングの製作にご活躍いただきました。また、氏の高計数率型光パルサーの研究の成果は、ブースター使用による高計数率環境での光電子増倍管の動作について、大いに参考にさせていただきました。皆様に心より感謝の意を表したいと思います。

最後に、大学入学時より大学生活をサポートしてくださった名古屋大学航空工学科の鈴木正之教授に厚く御礼申し上げます。また、両親と兄妹、義姉の有形無形の援助がなければ、私はいままで研究活動を続けることはできませんでした。この場をお借りして感謝の意を表します。本当にありがとうございました。

そして、研究仲間でもあり、いつも誰よりも支えてくれた近藤薫さんに、心からの、心ばかりの感謝のしるしとして、この論文を送りたいと思います。

参考文献

- [1] M. J. Alguard et al. Deep inelastic scattering of polarized electrons by polarized protons. *Phys. Rev. Lett.*, 37:1261, 1976.
- [2] G. Baum et al. A new measurement of deep inelastic ep asymmetries. *Phys. Rev. Lett.*, 51:1135, 1983.
- [3] J. Ashman et al. A measurement of the spin asymmetry and determination of the structure function $g(1)$ in deep inelastic muon proton scattering. *Phys. Lett.*, B206:364, 1988.
- [4] J. Ashman et al. An investigation of the spin structure of the proton in deep inelastic scattering of polarized muons on polarized protons. *Nucl. Phys.*, B328:1, 1989.
- [5] John R. Ellis and Robert L. Jaffe. A sum rule for deep inelastic electroproduction from polarized protons. *Phys. Rev.*, D9:1444, 1974.
- [6] B. Adeva et al. Measurement of the spin dependent structure function $g_1(x)$ of the deuteron. *Phys. Lett.*, B302:533–539, 1993.
- [7] D. Adams et al. Measurement of the spin dependent structure function $g_1(x)$ of the proton. *Phys. Lett.*, B329:399–406, 1994.
- [8] D. Adams et al. A new measurement of the spin dependent structure function $g_1(x)$ of the deuteron. *Phys. Lett.*, B357:248–254, 1995.
- [9] D. Adams et al. The spin-dependent structure function $g_1(x)$ of the deuteron from polarized deep-inelastic muon scattering. *Phys. Lett.*, B396:338–348, 1997.
- [10] B. Adeva et al. The spin-dependent structure function $g_1(x)$ of the proton from polarized deep-inelastic muon scattering. *Phys. Lett.*, B412:414–424, 1997.
- [11] J. D. Bjorken. Applications of the chiral $u(6) \times (6)$ algebra of current densities. *Phys. Rev.*, 148:1467–1478, 1966.

-
- [12] J. D. Bjorken. Inelastic scattering of polarized leptons from polarized nucleons. *Phys. Rev.*, D1:1376–1379, 1970.
 - [13] P. L. Anthony et al. Determination of the neutron spin structure function. *Phys. Rev. Lett.*, 71:959–962, 1993.
 - [14] P. L. Anthony et al. Deep inelastic scattering of polarized electrons by polarized He-3 and the study of the neutron spin structure. *Phys. Rev.*, D54:6620–6650, 1996.
 - [15] K. Abe et al. Precision measurement of the proton spin structure function $g_1(p)$. *Phys. Rev. Lett.*, 74:346–350, 1995.
 - [16] K. Abe et al. Measurements of the proton and deuteron spin structure functions g_1 and g_2 . *Phys. Rev.*, D58:112003, 1998.
 - [17] K. Abe et al. Precision determination of the neutron spin structure function $g_1(n)$. *Phys. Rev. Lett.*, 79:26–30, 1997.
 - [18] K. Abe et al. Measurement of the neutron spin structure function $g_2(n)$ and asymmetry $A_2(n)$. *Phys. Lett.*, B404:377–382, 1997.
 - [19] P. L. Anthony et al. Measurement of the proton and deuteron spin structure functions g_2 and asymmetry $A(2)$. *Phys. Lett.*, B458:529–535, 1999.
 - [20] P. L. Anthony et al. Measurement of the deuteron spin structure function $g_1(d)(x)$ for $1-(\text{GeV}/c)^2 < Q^2 < 40-(\text{GeV}/c)^2$. *Phys. Lett.*, B463:339–345, 1999.
 - [21] K. Ackerstaff et al. Measurement of the neutron spin structure function $g_1(n)$ with a polarized He-3 internal target. *Phys. Lett.*, B404:383–389, 1997.
 - [22] B. Adeva et al. A next-to-leading order QCD analysis of the spin structure function g_1 . *Phys. Rev.*, D58:112002, 1998.
 - [23] William A. Bardeen, A. J. Buras, D. W. Duke, and T. Muta. Deep inelastic scattering beyond the leading order in asymptotically free gauge theories. *Phys. Rev.*, D18:3998, 1978.
 - [24] Richard D. Ball, Stefano Forte, and Giovanni Ridolfi. A next-to-leading determination of the singlet axial charge and the polarized gluon content of the nucleon. *Phys. Lett.*, B378:255–266, 1996.

- [25] Yuri L. Dokshitzer. Calculation of the structure functions for deep inelastic scattering and e^+e^- annihilation by perturbation theory in quantum chromodynamics. (in russian). *Sov. Phys. JETP*, 46:641–653, 1977.
- [26] V. N. Gribov and L. N. Lipatov. Deep inelastic ep scattering in perturbation theory. *Yad. Fiz.*, 15:781–807, 1972.
- [27] Guido Altarelli and G. Parisi. Asymptotic freedom in parton language. *Nucl. Phys.*, B126:298, 1977.
- [28] M. Amarian. Double spin asymmetry in photoproduction of high-p(T) hadron pairs. *Nucl. Phys.*, A666:304–309, 2000.
- [29] K. Kuroda, D. Sillou, and F. Takeuchi. New type of position sensitive photomultiplier. *Rev. Sci. Instrum.*, 52:337–346, 1981.
- [30] Kei-Ichi Kuroda. Recent progress of fibre detectors. *Czech. J. Phys., Suppl.*, A : 51:331–343, 2001.
- [31] V. Agoritsas et al. Scintillating fiber detectors using position-sensitive photomultipliers. *Nucl. Phys. Proc. Suppl.*, 44:323–331, 1995.
- [32] V. Agoritsas et al. Scintillating fiber hodoscopes using position-sensitive photomultipliers. *Nucl. Instrum. Meth.*, A372:63–69, 1996.
- [33] V. Agoritsas et al. Read-out of scintillating fibres using a weak cross-talk position-sensitive photomultiplier. *Nucl. Instrum. Meth.*, A406:393–402, 1998.
- [34] V. Agoritsas et al. Development of a scintillating-fibre detector for fast topological triggers in high-luminosity particle physics experiments. *Nucl. Instrum. Meth.*, A411:17–30, 1998.
- [35] A. V. Efremov and O. V. Teryaev. Spin structure of the nucleon and triangle anomaly. JINR-E2-88-287.
- [36] Guido Altarelli and G. G. Ross. The anomalous gluon contribution to polarized lepton production. *Phys. Lett.*, B212:391, 1988.
- [37] Robert D. Carlitz, John C. Collins, and Alfred H. Mueller. The role of the axial anomaly in measuring spin dependent parton distributions. *Phys. Lett.*, B214:229, 1988.

-
- [38] T. Gehrmann and W. James Stirling. Spin dependent parton distributions from polarized structure function data. *Z. Phys.*, C65:461–470, 1995.
- [39] T. Gehrmann and W. James Stirling. Drell-Yan asymmetries at HERA-N(pol.). 1995.
- [40] M. Gluck, E. Reya, M. Stratmann, and W. Vogelsang. Next-to-leading order radiative parton model analysis of polarized deep inelastic lepton - nucleon scattering. *Phys. Rev.*, D53:4775–4786, 1996.
- [41] J. J. Aubert et al. D^0 production in deep inelastic muon scattering on hydrogen and deuterium. *Phys. Lett.*, B167:127, 1986.
- [42] A. Gomez Nicola and R. F. Alvarez-Estrada. Anomalies and $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ decay at finite temperature and density. *Z. Phys.*, C60:711–720, 1993.
- [43] M. Gluck, E. Reya, and W. Vogelsang. Determination of spin dependent parton distributions in polarized lepton production of jets and heavy quarks. *Nucl. Phys.*, B351:579–592, 1991.
- [44] A. D. Watson. Spin-spin asymmetries in inclusive muon proton charm production. *Zeit. Phys.*, C12:123, 1982.
- [45] W. Vogelsang. Prospects of measuring Delta G at HERA. In *Hamburg 1991, Proceedings, Physics at HERA, vol. 1* 389- 409. (see HIGH ENERGY PHYSICS INDEX 30 (1992) No. 12988).
- [46] M. Gluck and E. Reya. Spin dependent parton distributions in polarized deep inelastic lepton nucleon scattering. *Z. Phys.*, C39:569, 1988.
- [47] L. Montanet et al. Review of particle properties. Particle Data Group. *Phys. Rev.*, D50:1173–1823, 1994.
- [48] D. Adams et al. Spin structure of the proton from polarized inclusive deep- inelastic muon proton scattering. *Phys. Rev.*, D56:5330–5358, 1997.
- [49] W. de Boer. Dynamic orientation of nuclei at low temperatures: A study of the mechanisms of dynamic polarization in polarized targets. CERN-74-11.
- [50] C. D. Jeffries. History of the development of polarized targets. In *Bonn 1990, Proceedings, High energy spin physics, vol. 1* 3-19.

- [51] J. Ball et al. First results of the large COMPASS ^6LiD polarized target. *Nucl. Instrum. Meth.*, A. To be published.
- [52] A. Magnon et al. Tracking with $40\times 40\text{-cm}^2$ MICROMEGAS detectors in the high energy, high luminosity COMPASS experiment. *Nucl. Instrum. Meth.*, A478:210–214, 2002.
- [53] D. Thers et al. Micromegas as a large microstrip detector for the COMPASS experiment. *Nucl. Instrum. Meth.*, A469:133–146, 2001.
- [54] M. C. Altunbas et al. Construction, test and commissioning of the triple-GEM tracking detector for COMPASS. *Nucl. Instrum. Meth.*, A490:177–203, 2002.
- [55] B. Ketzer et al. Triple GEM tracking detectors for COMPASS. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 49:2403–2410, 2002.
- [56] S. Bachmann et al. Performance of GEM detectors in high intensity particle beams. *Nucl. Instrum. Meth.*, A470:548–561, 2001.
- [57] M. Colantoni et al. Design and performances of fast front-end electronics for COMPASS MWPCs. Given at 2001 IEEE Nuclear Science Symposium, November 4-10, 2001, San Diego, CA, USA.
- [58] H. Fischer et al. Implementation of the dead-time free F1 TDC in the COMPASS detector readout. *Nucl. Instrum. Meth.*, A461:507–510, 2001.
- [59] I. Konorov et al. The Trigger Control System for the COMPASS experiment. Given at 2001 IEEE Nuclear Science Symposium, November 4-10, 2001, San Diego, CA, USA.
- [60] B. G. Taylor. TTC distribution for LHC detectors. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 45:821–828, 1998.
- [61] G. Braun et al. F1: An eight channel time-to-digital converter chip for high rate experiments. 1999.
- [62] IEEE P1386. Standard for a Common Mezzanine Card Family: CMC.
- [63] Cypress Semiconductor. CY7B923/CY7B933 HOTLink Transmitter/Receiver Preliminary Data Sheet. Cypress Semiconductor High Performance Data Book, August 1, 1993.
- [64] E. van der Bij, R. McLaren, and Z. Meggyesi. S-LINK: A prototype of the ATLAS read-out link. Given at 4th Workshop on Electronics for LHC Experiments (LEB 98), Rome, Italy, 21-25 Sep 1998.

-
- [65] F. Bosi et al. Tests of scintillating fiber tracking detector based on position sensitive photomultiplier readout. *Nucl. Instrum. Meth.*, A374:48–56, 1996.
- [66] D. Albers et al. Studies on scintillating fiber response. *Nucl. Instrum. Meth.*, A371:388–396, 1996.
- [67] L. Lanceri and G. Vuagnin. A scintillating fiber hodoscope with multianode photomultiplier readout. *Nucl. Instrum. Meth.*, A357:87–94, 1995.
- [68] K. Kuroda et al. A scintillating fiber hodoscope using a position sensitive photomultiplier. *Nucl. Instrum. Meth.*, A300:259–267, 1991.
- [69] P. Annis. The CHORUS scintillating fiber tracker and its monitoring systems. *Nucl. Instrum. Meth.*, A409:629–633, 1998.
- [70] P. Annis et al. The CHORUS scintillating fiber tracker and opto-electronic readout system. *Nucl. Instrum. Meth.*, A412:19–37, 1998.
- [71] A. Ichikawa et al. Scintillating microfibers as a high-resolution tracking detector for hybrid-emulsion experiment. *Nucl. Instrum. Meth.*, A417:220–229, 1998.
- [72] M. Atac. Scintillating fiber tracking at high luminosities using visible light photon counter readout. To be published in the proceedings of 1st International High Energy Physics Conference: The Four Seas Conference - Physics without Frontier, Trieste, Italy, 25 Jun - 1 Jul 1995.
- [73] T. Okusawa, Y. Sasayama, M. Yamasaki, and T. Yoshida. Readout of a 3 m long scintillating fiber by an avalanche photodiode. *Nucl. Instrum. Meth.*, A459:440–447, 2001.
- [74] T. Okusawa, Y. Sasayama, M. Yamasaki, and T. Yoshida. Readout of a scintillating-fiber array by avalanche photodiodes. *Nucl. Instrum. Meth.*, A440:348–354, 2000.
- [75] A. Gorin et al. *Czech. J. Phys.*, 49:173, 1999.
- [76] Kuraray Co., Ltd. Scintillation Materials. Technical Information.
- [77] Hamamatsu Photonics K. K. Multianode photomultiplier assembly H6568, H6568-10, 1998. Technical Information.
- [78] 鳥光悟. COMPASS ビームトラッカー性能評価の為の High Rate Photo Pulser 開発. 修士論文, 名古屋大学, 2001.

参考文献

- [79] A. Gorin et al. Peak-sensing discriminator for multichannel detectors with cross-talk. *Nucl. Instrum. Meth.*, A452:280–288, 2000.
- [80] LeCroy Co., Ltd. Multihit Time to Digital Converter 3377. Technical Information.
- [81] Roehm GmbH. Rohacell IG, Rohacell P. Technical Information.
- [82] Martin Frhr. von Hodenberg. A first Reconstruction of COMPASS Data. Diploma theses, Freiburg, June 2002.