

修士論文
大立体角中性子検出器 NEBULA の開発と性能評価

基礎物理学専攻 中村研究室
09M01119 河田鷹介

平成 23 年 2 月 18 日

概要

NEBULA("NEutron Detection system for Breakup of Unstable Nuclei with Large Acceptance") は、理化学研究所仁科加速器研究センターにおいて現在建設中の多種粒子検出器"SAMURAI"の構成要素として建設されている、大型の中性子検出器システムである。NEBULAの有感領域は1800mm(H) × 3600mm(V)で、飛距離10mの中性子に対して水平方向 $\pm 10^\circ$ 、垂直方向 $\pm 5^\circ$ の大きな立体角を持つ。また実効厚みは480mmであり、1中性子に対して41%と比較的高い効率を持つ。これを、同じく建設中の超伝導多粒子磁気分析器(SAMURAI)と組み合わせ、中性子過剰核の核反応、特に (γ, n) 型の核崩壊反応により放出される中子を高効率で検出、新しい中性子過剰核の状態を探ることを目的とする。本論文では、2012年にオンラインでの実験が予定されているNEBULAについて、オフライン実験によるその性能の評価および評価方法そのものの確立を目指す。

Abstract

NEBULA("NEutron Detection system for Breakup of Unstable Nuclei with Large Acceptance") is a large Neutron-Detector array which now being constructed in RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science. NEBULA has a large effective area (1800mm(V) x 3600m(W)). NEBULA is expected to be located at about 10m from the target position, which corresponds to the angular acceptance of +/-10deg(H) x +/-deg(V). NEBULA is composed of 2 layers, each of which has 30*2 neutron detector modules associated with 12 VETO detectors, are each module is made of fast plastic scintillator(BC-408), with both ends being coupled to a photo-multiplier tube. So NEBULA also has high intrinsic detection-efficiency for neutrons of 40

NEBULA Detector is planned as a part of multi-particle spectrometer "SAMURAI(Superconducting Analyzer for Multi particles from RadioIsotope Beams)". This is a detector complex for RI-Beam experiment. It aims very broad physical topics, and NEBULA especially play an important role for (γ ,n)-type invariant-mass spectroscopy experiment. NEBULA is just suitable to detect fast neutrons(100-300MeV) emitted for a wide solid angle in such as experiment.

In this thesis, I have evaluated particle-detection performance of NEBULA's neutron detectors and also aimed at establishing a method to evaluate basic performance of NEBULA by an offline test experiment. I have used only off-line event-sources such as cosmic rays and RI source. I have constructed electronics and data-acquisition system(DAQ), tested and calibrated electronics modules. I used 3 event sources — Time Calibrator Module, Cosmic Ray and RI Source. The Calibrator was only used for th timing. Cosmic Ray is used for general purposes. RI Source $^{241}\text{Am-Be}$ was used for the energy calibration. Using these sources, I calibrated time and energy scales. For position calibration, I used external reference detectors. I obtained exact reference for timing-to-position calibration. Using calibrated position and geometrical analysis, slew corrections were made as well to obtain better timing resolution. Finally the obtained position and timing resolutions are shown.

目次

第 1 章	序論	6
1.1	イントロダクション	6
1.2	NEBULA が狙う物理	6
1.3	本論文の目的	6
第 2 章	中性子検出器 NEBULA	9
2.1	中性子検出器 NEBULA の概要	9
2.2	検出器部	11
2.2.1	シンチレータ	11
2.2.2	光電子増倍管	11
2.2.3	ライトガイド	12
2.2.4	検出器のマウント	12
2.3	電源系	13
2.4	信号処理系 (回路系)	13
2.4.1	各種 VME モジュール	14
2.5	データ収集システム	15
2.5.1	VME インタフェースによる通信	16
第 3 章	宇宙線を用いた NEBULA 性能評価実験	18
3.1	実験における NEBULA の基本構成	18
3.2	実施した測定	18
3.3	TDC Calibrator によるモジュール較正 (ドライラン)	18
3.4	NEBULA 単体での宇宙線測定	19
3.5	外部検出器との宇宙線同時測定	19
3.6	^{241}Am -Be 線源の測定	20
第 4 章	実験データの解析と較正	24
4.1	キャリブレーション (較正) の流れ	24
4.2	NEBULA で測定される物理量	24
4.2.1	基本測定量 (Raw データ)	24
4.2.2	Raw データから導かれる物理量	26
4.3	データの解析と補正	29
4.3.1	タイミング情報の実時間化 (TDC キャリブレーション)	30
4.3.2	QDC ペDESTAL の除去	30
4.3.3	PMT 印加電圧の調整 (PMT ゲインの調整)	31
4.3.4	エネルギーの較正	32
4.3.5	位置の較正	34
4.3.6	時間の較正	37
第 5 章	データの解析結果と議論	47
5.1	時間較正と時間分解能	47
5.2	位置較正と位置分解能	47
5.3	結果の評価	47
第 6 章	まとめ	50
付録 A	測定種別と RUN ナンバー対応	51

目次

1.1	Nebula 正面	6
1.2	SAMURAI 概念図	7
1.3	SAMURAI システムにおける Nebula の配置 (東北大学 小林俊雄氏の資料より)	7
1.4	Nebula アレイ	8
2.1	NEBULA シンチレータ形状	9
2.2	NEBULA 構成図	10
2.3	NEBULA 架台	11
2.4	BC-408 プラスチックシンチレータの光吸収曲線	12
2.5	光電子増倍管 R7724ASSY の底面	12
2.6	光電子増倍管用磁気シールド	13
2.7	VETO 検出器の架台への固定法	13
2.8	電源系	14
2.9	NEBULA 回路系ブロック図	14
2.10	結線済みの回路ラック	15
2.11	500ns ケーブルディレイの配置	15
2.12	回路系ラック上の配置	16
2.13	DAQ ブロック図	16
3.1	モジュール較正の回路セットアップ	19
3.2	宇宙線測定 of 回路セットアップ	20
3.3	横置きシンチレータによる位置の較正	21
3.4	位置較正用横置きシンチレータの配置	22
3.5	AmBe 線源	22
3.6	AmBe 線源によるコンプトンエッジ	23
4.1	較正フローチャート	24
4.2	CAEN V772TDC I/O ダイアグラム	25
4.3	タイミング情報生成回路	25
4.4	全体のタイミング生成回路	26
4.5	CAEN V795QDC I/O ダイアグラム	26
4.6	アナログ情報生成回路	27
4.7	NEBULA ビーム座標系	28
4.8	TDC キャリブレーション時の回路	30
4.9	TDC Calibrator によるキャリブレーション	30
4.10	QDC ペDESTAL測定回路	31
4.11	QDC ペDESTALとその除去	31
4.12	γ 線源のコンプトンエッジとその同定	33
4.13	宇宙線検出器シミュレータによるエネルギー損失スペクトル	33
4.14	宇宙線測定時のアナログスペクトル及びそのフィット結果	34
4.15	横置きしたシンチレータによる位置較正 (再掲)	36
4.16	位置較正における上下時間差スペクトル	37
4.17	Y の較正結果	38
4.18	y の較正結果 (ゲートなし)	39
4.19	飛跡トラッキングの残差分布	40
4.20	slew の例	40
4.21	Constant Fraction Triggering の図解	41
4.22	タイミングと入射軌跡の依存関係	42
4.23	天頂角と時間差の関係 (1)	43

4.24	天頂角と時間差の関係 (2)	43
4.25	天頂角と時間差の関係 (3)	44
4.26	「時間差の差」と天頂角の対応	44
4.27	タイミングの位置依存性除去における'良い'イベント	45
4.28	アナログ-時間差相関と Slew	45
4.29	slew 補正後のアナログ-時間差相関	45
4.30	時間差の分解能	46

表 目 次

2.1	NEBULA1 層あたりの構成モジュール	10
2.2	BC-408 プラスチックシンチレータの諸元 (Saint-Goban による資料から主要部を抜粋)	11
2.3	光電子増倍管 R7724ASSY 主要諸元	11
2.4	シンチレータ用ライトガイド	12
3.1	性能評価実験実施時の NEBULA のシステム構成	18
4.1	QDC Calibration	32
4.2	各中性子検出器のエネルギー較正点 (ch)	35
5.1	リファレンス検出器の時間分解能	47
5.2	時間分解能	48
5.3	位置分解能	49
A.1	測定 Run ナンバーと実験内容の対応	51

第1章 序論

1.1 イントロダクション

独立行政法人理化学研究所（以下、「本研究所」という）では、サイクロトロンによって加速される高速重イオンビームを生成標的に当て、超伝導 RI ビーム生成装置 BigRIPS を用いて RI ビーム (Radioactive Isotope ビーム：放射性同位元素ビーム) を生成するという RI ビームファクトリーが現在稼働している。BigRIPS によって生成された RI ビームは、下流に設置する各種の RI ビーム分配ラインを通り実験装置に輸送され、様々な実験研究に使用される。本論文の対象である NEBULA は、その実験装置の一つである。



図 1.1: Nebula の正面。VETO 検出器が見えている。なお写真に写っているのは前から順に 2 番、3 番、4 番目の架台。1 番架台はこの特別の場所にあった。

NEBULA (“NEutron Detection system for Breakup of Unstable Nuclei with Large Acceptance”) は、現在計画・建設中の多種粒子検出器 “SAMURAI” の構成要素として計画された大型の中性子検出器システムである。NEBULA の役割は、不安定核ビームを用いた分解反応等で発生する高速な中性子 (運動エネルギー 100-300MeV 程度) の速度および通過位置を測定することである。これらの中性子は高速でありかつ広範囲に散乱されるため、NEBULA の検出性能は大立体角かつ高効率であることを要求される。このことと速度・位置の測定精度を両立させるため、NEBULA は小型の検出器モジュールを多数組み合わせられて構成されている。

1.2 NEBULA が狙う物理

前述したように、中性子検出器である NEBULA は、理化学研究所 RI ビームファクトリーで計画されている多種粒子検出器 “SAMURAI (Superconducting Analyzer for Multi particles from Radioisotope Beams)”¹ の一部分構成する検出器である (図 1.2)。SAMURAI は、最大 $B\rho$ 値 7Tm の超伝導双極電磁石を核とする磁気分析器で、回転する磁石に合わせて検出器の配置を変えることで多様な実験に対応できる (図 1.3)。

NEBULA は (γ, n) 型不変質量分光において特に重要な役割を果たす。反応 (γ, n) は γ 線が入射して中性子が放出されると見なせる反応で、たとえばクーロン相互作用による崩壊反応がこれにあたる。

1.3 本論文の目的

今後 NEBULA は、2012 年のオンラインビーム実験に向けて性能の評価と解析手法を確立する段階に入っている。本論文では、ビームを使わず、線源や宇宙線などのオフラインイベントソースを用いて NEBULA 単独での検出テ

¹”with 7Tm” を付けて SAMURAI7 とも呼ばれる

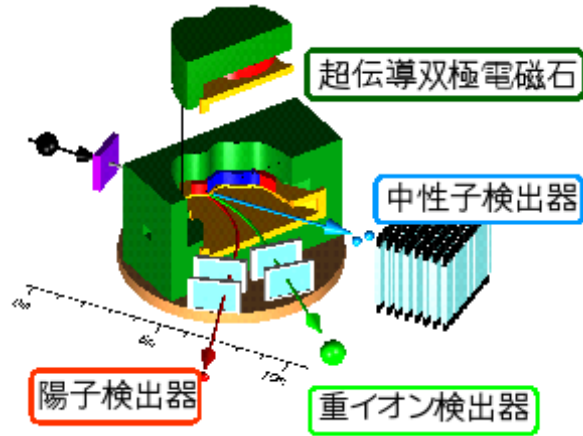


図 1.2: 超伝導双極電磁石 SAMURAI を核とした多種粒子測定装置システム

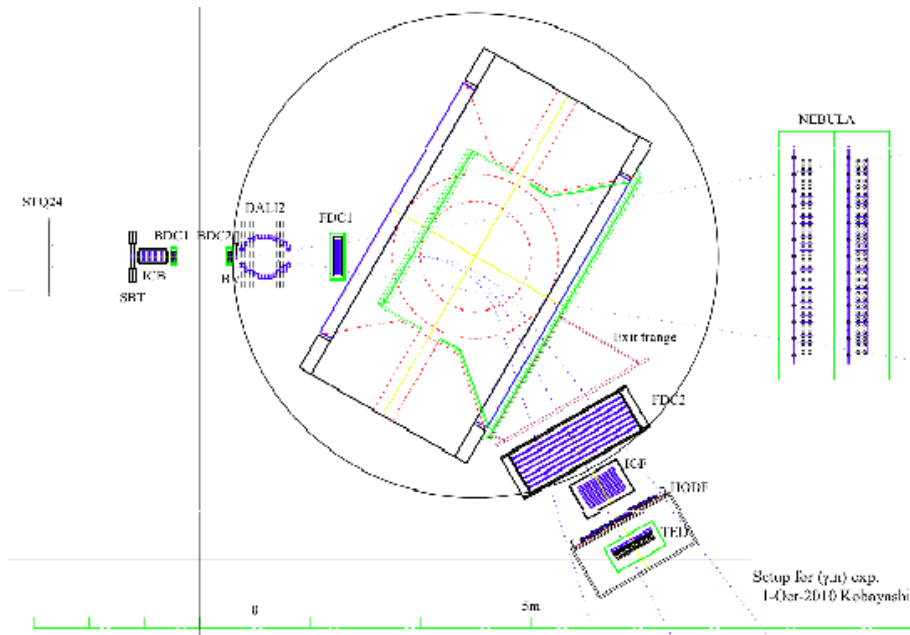


図 1.3: SAMURAI システムにおける Nebula の配置 (東北大学 小林俊雄氏の資料より)

ストを行い、その性能を評価することおよび評価法そのものを確立することを目指す。

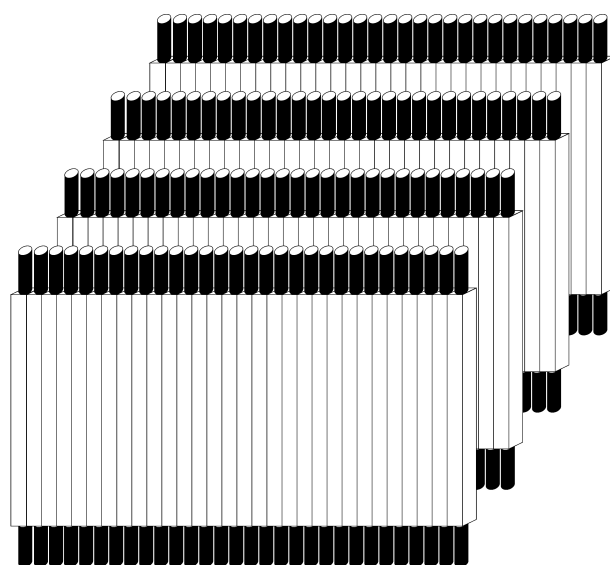


図 1.4: Nebula の検出器アレイ。当初は上図の通り架台 4 基に検出器アレイ 8 層の構成であったが、2011 年現在は架台 2 基に計画が変更されている。

第2章 中性子検出器 NEBULA

本章では、本論文の研究対象である大型検出器 NEBULA についてある程度詳細な説明を行う。

2.1 中性子検出器 NEBULA の概要

Nebula は、運動エネルギーが 100-300MeV の高速な中性子を検出するための実験装置である。中性子は電荷を持たないために電磁相互作用を行わず、直接検出は荷電粒子よりもはるかに困難である。しかし、シンチレータに入射した中性子は強い相互作用によりシンチレータ中の水素や炭素と反応することがある。この反応で主として反跳される陽子は荷電粒子であり、電磁相互作用によりシンチレーション光を放出するので、これを利用することで間接的に中性子を検出することができる。

NEBULA は、12cm(H)×12cm(D)×180cm(V) のプラスチックシンチレータ (NEUT)1 基とその両端に取り付けられた光電子増倍管 2 本からなるモジュールを基本単位として、それを 30×2 基並べたもの 4 層からなる中性子検出器である。各層には更に、32cm(H)×1cm(D)×190cm(V) のプラスチックシンチレータ 12 基が VETO 検出器として備えられている (図 2.1)。これより、NEBULA の各層は実効面積 360cm×180cm で、4 層をあわせると奥行きは 96cm となる (ただし、現段階では NEUT2 層分、VETO4 層分のみ購入されている)。

NEUT,VETO を構成するモジュールは、図 2.1 にあるように、Saint-Goban 製 BC-408 プラスチックシンチレータの上下端に浜松ホトニクス製 R7724ASSY 光電子増倍管 2 本を取り付けて両読み検出器としたものである。

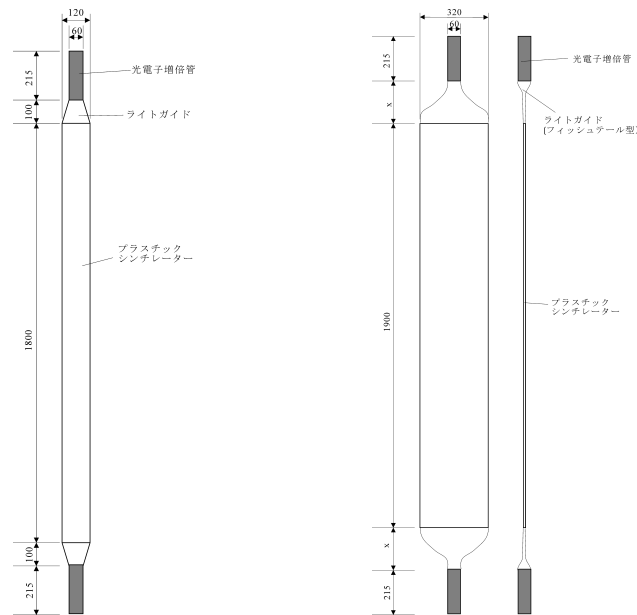


図 2.1: NEBULA で使用するシンチレータの形状。左：中性子検出器用 右：VETO 用。VETO 用シンチレータは中性子検出確率をできるだけ下げたためビーム方向に薄い。シンチレータには Saint-Goban 社製 BC-408, 光電子増倍管は浜松ホトニクス製 R7724ASSY を採用している。

NEBULA システムの構成部分は大きく次の 4 つに分けられる：

- 粒子検出器 (シンチレータ・光電子増倍管)
- 電源供給
- 信号処理回路
- データ収集システム (DAQ)

粒子検出器は、シンチレータを通過した荷電粒子が失ったエネルギーを電流に変換し出力する。出力された信号は回路部で信号処理され、タイミングとアナログの2つの情報に変換される。データ収集システムはPC上に構築された周辺機器制御システムで、回路部で作られた情報をVMEインタフェースを経由して取り込み保存する他、反対にVMEインタフェースを通じて回路部のVMEモジュールの制御も行う。電源供給部は、個々の光電子増倍管に安定した電圧を供給する。

表 2.1 にあるのはNEBULA1 層分の構成要素である。これらのモジュールは、1 層毎に図 2.2 のようにしてフレーム(架台)に搭載される。

種別	型番	目的	単位
プラスチックシンチレータ	BC-408	荷電粒子の検出 (中性子用) ¹	60
プラスチックシンチレータ	BC-408	荷電粒子の検出 (VETO 用) ²	12
光電子増倍管 (PMT)	R7724ASSY	蛍光から光電流への変換	144
電源フレーム	SY1527LC	PMT への電圧供給	1
電源供給ボード	A1535N	PMT への電圧供給	7
ディスクリミネータ	V895	PMT からのタイミング信号の弁別	12
コインシデンス	N-RS413	トリガ信号の生成	6
Logic ディレイ	RPV-090	タイミング信号の時間調整	6
TDC	V775 AC	タイミング情報の取得	6
アナログ(ケーブル)ディレイ	RG174/U	アナログ信号の波高・時間調整	10
QDC	V792 AC	アナログ情報の取得	6
VME クレート	8100/04	VME モジュールの収容・電源供給	2
VME クレートコントローラ	618-3	VME モジュールの制御	2
I/O レジスタ	RPV-130	トリガ信号の制御	1

表 2.1: NEBULA1 層あたりの構成モジュール

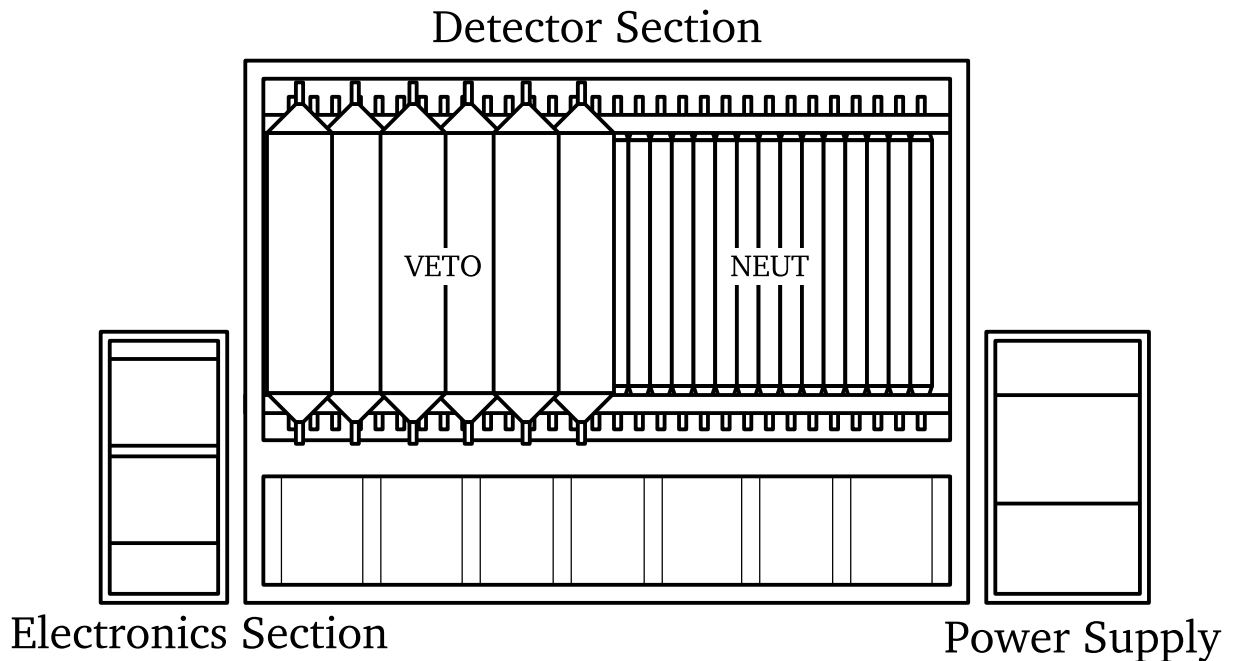


図 2.2: 正面(ビーム飛来方向)から見たNEBULAの構成。NEUT(中性子検出器)は30基並べたものを1面として前後2面。VETO検出器は実際にはNEUTを覆い隠すように12基配置される。

¹形状:12×12×180cmの直方体

²形状:3×32×190cmの薄板状直方体



図 2.3: NEBULA の架台 (2-4 番)。この架台にシンチレータ、電源、回路など、NEBULA を構成する殆ど全てを搭載する。ただしこの写真では回路用のラックは取り付けられていない。

2.2 検出器部

2.2.1 シンチレータ

NEBULA の核となる荷電粒子検出器は、1 基あたり 72 体のプラスチックシンチレータからなる。NEBULA で使用するシンチレータの材質は Saint-Goban 社の製品 BC-408 である。BC-408 のカタログ性能を表 2.2 に示す。このプラスチックシンチレータを、中性子検出用および VETO 用に 2 種類の形状に加工したものを使用する (図 2.1)。中性子検出器は中性子検出効率を上げるために大きな厚み (120mm) を持つ。一方 VETO 用検出器は中性子をなるべく検出しないために薄くされている。シンチレータの側面は遮光シートで覆い、上底面にライトガイドと光電子増倍管を接着する。

製造者	型番	ベース物質	比重
Saint-Goban	BC-408	ポリビニルトルエン	1.032
Rise Time	Decay Time	蛍光パルス巾 (FWHM)	減衰長
0.9ns	2.1ns	~2.5ns	210cm

表 2.2: BC-408 プラスチックシンチレータの諸元 (Saint-Goban による資料から主要部を抜粋)

2.2.2 光電子増倍管

NEBULA で用いる光電子増倍管として浜松ホトニクス製 R7724ASSY を使用する (表 2.3)。以下光電子増倍管を PMT と称する。PMT の光電面は各シンチレータの上下にライトガイドを介して接着され、シンチレータが発した蛍光を電流に変換する。得られた光電流は PMT の光電面と逆側の底面にあるジャックから出力される (図 2.5)。出力は 2 系統あり、タイミング信号およびアナログ信号としてそれぞれ別々の信号処理を施されるが、信号自体はまったく同一のものである。

製造者	型番	構造タイプ	管径
浜松ホトニクス	R7724ASSY	ヘッドオン型	φ51
最大電圧	ダイノード構造	ダイノード段数	光電面種類
-2000V	ライン	10	バイアルカリ

表 2.3: 光電子増倍管 R7724ASSY 主要諸元

PMT への磁場の影響を低減するため、VETO 検出器用の PMT には磁気シールドが装着される (図 2.6)。磁気シールドは PMT 全体を丁度覆える大きさの軟鉄製の筒で、絶縁の為にカプトンフィルムを挟んで使用する。

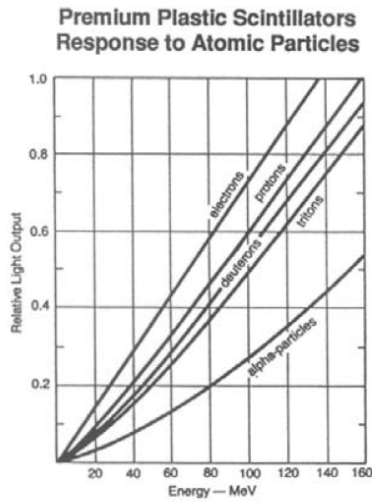


図 2.4: BC-408 プラスチックシンチレータの光吸収曲線 (Saint-Goban 社の Material Datasheet より転載)

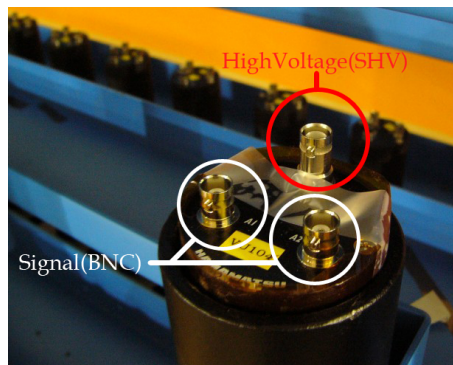


図 2.5: 光電子増倍管 R7724ASSY の底面。3 つのジャックはそれぞれ、赤丸が電圧印加用 SHV コネクタ、白丸が信号出力用 BNC コネクタ。2 つの信号出力は、一方はタイミング、もう一方はアナログ信号として扱われるが、2 つの信号自体は同一である。

2.2.3 ライトガイド

シンチレータの端面から出た光を PMT 光電面までロス無く伝送するため、シンチレータと PMT の間にライトガイドを挿入する。ライトガイドの形状は、NEUT 用と VETO 用でシンチレータの形に合わせて異なる (表 2.4)。

用途	UVT	形状
NEUT 用	あり	角錐台型
VETO 用	あり	フィッシュテール型

表 2.4: シンチレータ用ライトガイド

2.2.4 検出器のマウント

中性子検出器および VETO 検出器はフレームにマウントして使用する。中性子検出器は、架台内部に専用のホルダを設置してその上にマウントする。VETO 検出器は、架台前面 (ビーム飛来方向) に支持具を設置して、それがライトガイドを支点にして重量を支えるようにマウントする (図 2.7 参照)。



図 2.6: 磁気シールドが装着された VETO 検出器用光電子増倍管。赤丸で囲まれたものは装着準備をしているところで、絶縁用のカプトンフィルムが巻き付けられている。



図 2.7: NEBULA 架台に固定された VETO 検出器。左は全体像で、右は上下の固定部の拡大。

2.3 電源系

PMT に印加する電圧は PMT 出力の波高に強く影響するため、PMT の電源には精密性と安定性が要求される。NEBULA では、CAEN 製のメインフレーム SY1527LC 及びそれに挿入して使用する電源ボード A1535SN を電圧供給源とする (図 2.8)。電源ボード A1535N は 1 台あたり 24ch ある SHV コネクタから電圧を供給する。各コネクタから供給される電圧には ch 毎に異なる値を設定できる。電圧値の設定などの電源管理は、ネットワーク経由あるいはメインフレームに直接モニタ・キーボードを接続して行う。

2.4 信号処理系 (回路系)

PMT から出力されたアナログ信号・タイミング信号は信号処理用の回路で加工される。信号の処理は大まかに図 2.9 の通りに行われる。アナログ情報、タイミング情報はそれぞれ各 PMT 毎に独立して処理されるが、その処理の足並みを決めるトリガ信号は、全ての PMT からのタイミング信号を用いて生成される。

これらの回路は主にフレーム脇の 2 台の 19 インチラックに搭載される (図 2.10)。ただし 500ns ケーブルディレイはフレーム下部の専用スペースに収納される (図 2.11)。

ラックには VME クレートと NIM ピンがそれぞれ 1 台ずつマウントされており、その中に各種のモジュールがインストールされる (図 2.12)。各 PMT からの出力信号は、BNC-BNC ケーブルを通してこのラックの上部にある BNC-LEMO 変換パネルまで導かれる。

回路ラック上で処理された信号は、最終的には図 2.12 における右のラックにマウントされた VME クレート上の QDC, TDC によりデジタルデータに変換され、VME インタフェース経由で PC 上に構築されたデータ収集システムに取り込まれる。



図 2.8: 電源 SY1527LC(メインフレーム),A1535SN(ボード) 及び結線された SHV ケーブル

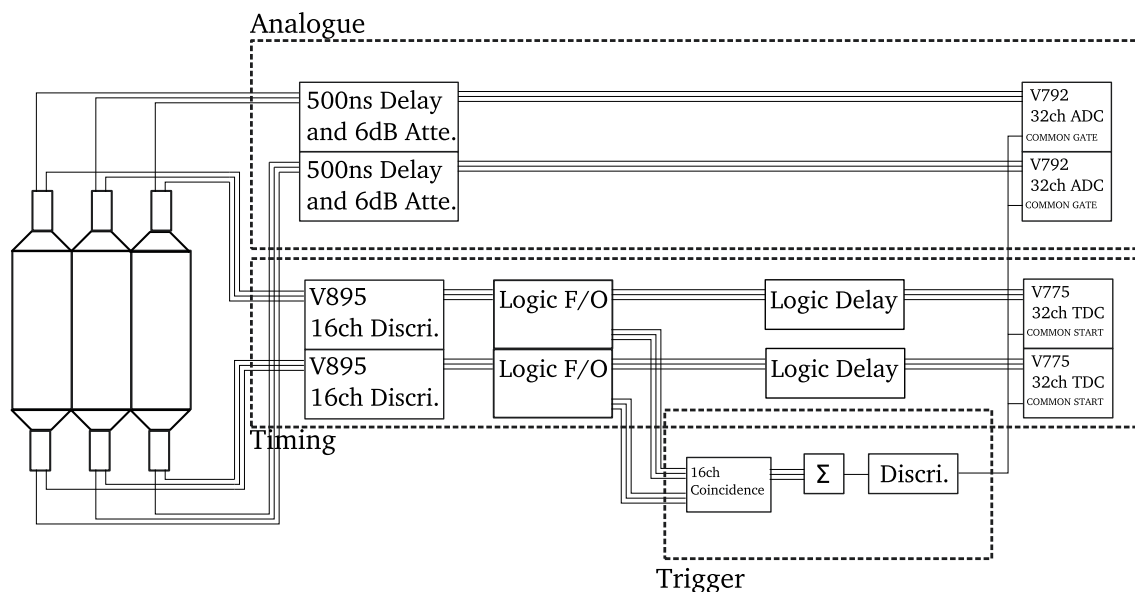


図 2.9: NEBULA 回路系のブロック図。NEBULA の検出器 1 面分の信号からデータを取得する為の回路。

2.4.1 各種 VME モジュール

NEBULA が搭載する信号処理回路のうち特に重要なものは、次の 4 種の VME モジュールである。

V792 32ch Analogue-to-Digital Converter

Analogue-to-Digital Converter(QDC. QDC とも) は、入力信号の電圧を時間積分してその信号が含んでいる電荷量を割り出し、それをデジタル値に変換する装置である。NEBULA が使用する QDC はイタリア CAEN 社製のモデル V792 である。V792 は、32ch 分の入力信号に対し個別に波高積分を行い、結果を保持する。この結果は ch 毎に複数保持できて、読み出しも逐次行える。

V775 32ch Time-to-Digital Converter

Time-to-Digital Converter(TDC) は、別個に入力される Start 信号と Stop 信号の時間差をデジタル値に変換する装置である。原理的には QDC とほぼ同一で、START 信号から STOP 信号の間に一定波高の信号を出力し、これを QDC に処理させてデジタル値を得る。NEBULA で使用する TDC は CAEN 社のモデル V775 で、32ch 分の信号を時間変換する。ただし 32ch になるのは START または STOP のうち一方のみで、片方は必ず全 ch 共通の信号 (COMMON) になる。NEBULA では START を全 ch 共通 (COMMON START) にしている。機能は V792 とほぼ同じである³。

³内部構造もほぼ同じ

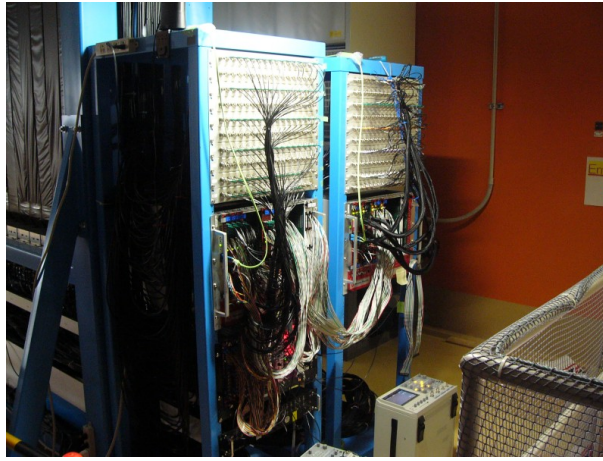


図 2.10: 結線された 2 台の回路ラック。左右どちらのラックにも、上から順に BNC-LEMO 変換パネル、VME クレート、NIM ピンがマウントされている。



図 2.11: マウントされた 500ns ケーブルディレイ。

V895 16ch Leading Edge Discriminator

ディスクリミネータ (縮めて Discr¹とも) は、入力信号をその波高で弁別 (Discrimination) する装置である。V895 ディスクリミネータは、16ch 分の入力信号に対し、個別に設定したしきい値でディスクリミネーションを行う。しきい値は VME インタフェースを通じて個別に設定できる他、ディスクリミネートされたときに発する Logic 信号の長さも設定できる⁴。2

RPV-130 I/O Register

DAQ⁵側が 1bit の情報を入力あるいは出力するための汎用モジュール。NEBULA では出力機能のみを用いる。

2.5 データ収集システム

信号処理系が生成した各検出器毎のアナログ・タイミング情報をイベント毎にまとめて収集・保存する為に、データ収集システム (Data Acquisition System:DAQ) が必要となる。NEBULA のテストでは理化学研究所で開発された 'NBBQ' を使用し、これを PCI-Express インタフェースを持つパソコン (OS:Scientific 3.0.9, Linux-2.4) にインストールして、データ収集および保存用サーバとして用いる。以後このマシンを 'nebulas01' と記す。

⁴これは全 ch 共通

⁵この呼称については後述

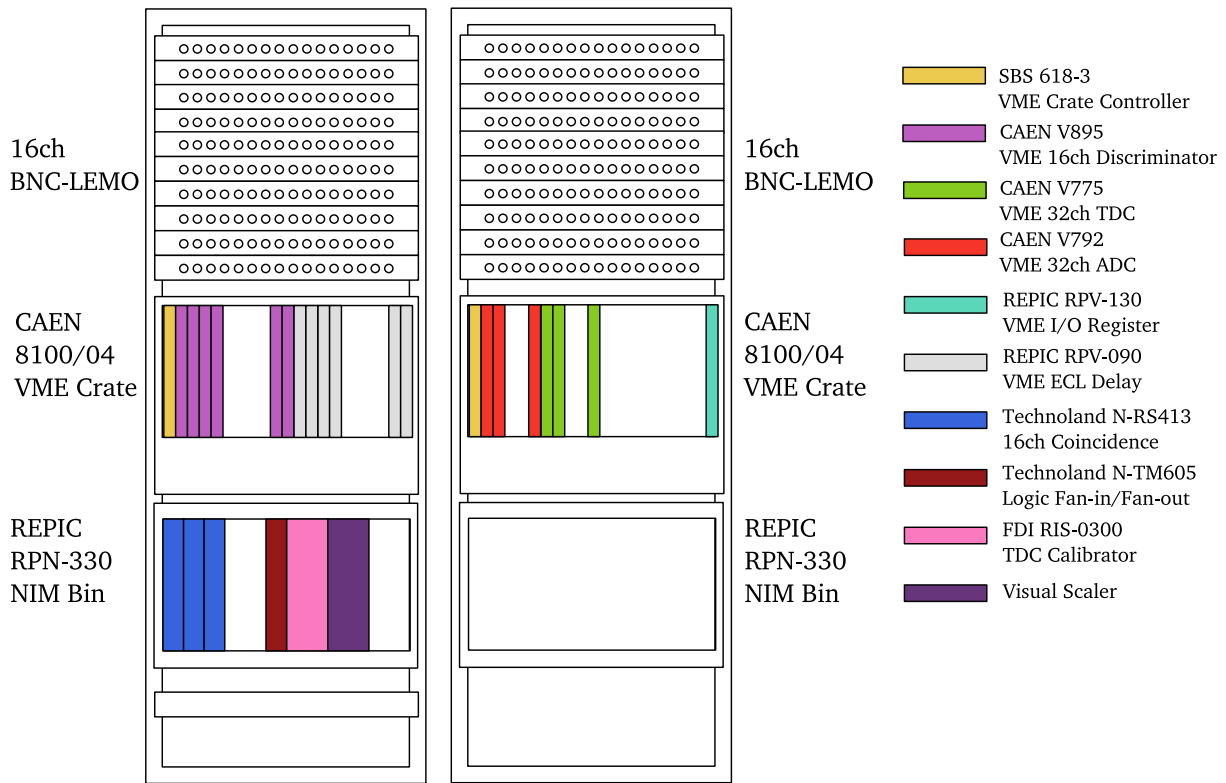


図 2.12: 回路系ラック上のモジュール配置。

2.5.1 VME インタフェースによる通信

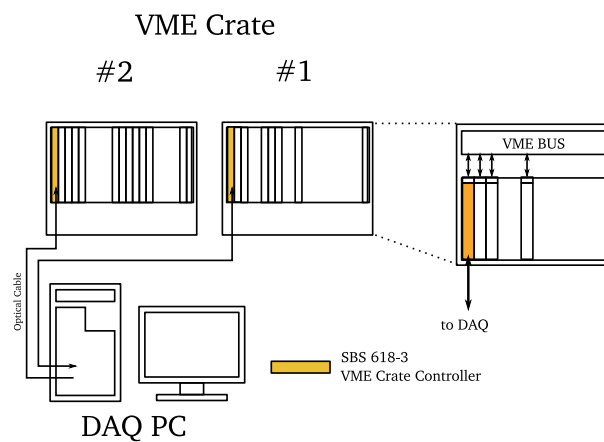


図 2.13: VME クレート-DAQ 間の接続のブロック図。右側は VME クレート内での通信の様子を表す。

NBBQ は、PCI-Express インタフェースを経由して CAMAC または VME モジュールと通信できる⁶。その概略を図 2.13 に示す。nebula01 背面の PCI-Express バスに光ケーブルを接続し、逆の端子を VME クレートに挿入された VME クレートコントローラ SBS 618-3 の端子に接続する。nebula01 はこのケーブルを通して VME モジュール各個との通信を行う。以後、nebula01 を「DAQ 側」、VME クレート及びモジュールなどを「VME 側」とそれぞれ記す。通信の主な用途は次の通り:

- モジュールのデータの読み取り
- (I/O レジスタを介した)BUSY 制御

⁶NEBULA では VME のみを使用する。

- モジュール設定の変更

データの読み取りは、VME モジュール側からの割り込み要求によって行われる。NEBULA で使用する QDC(CAEN V792) は、内部に一定数分のデータが溜まると割り込み要求を発生させる。DAQ は、この要求を感知すると、予め指定された読み取り対象モジュールのデータレジスタを読み込み、所定のデータ書式 (rdf フォーマット) に従って成形する。

BUSY 制御は、トリガの生成をコントロールする為の操作である。トリガ信号は、生成されるとラッチと呼ばれる回路に入力される。ラッチ回路は 1bit の状態保持回路で、トリガが入力されるとそれを保持し、解除信号が入力されるまで一定のロジック信号 (BUSY) を出力し続ける。この BUSY 信号の発生中はトリガの生成が無効になる。データ読み取りが終わったタイミングでトリガ生成を再度有効にするため、DAQ は I/O レジスタに信号発生を要求する。この信号は解除信号としてラッチ回路に入力され、トリガ生成にかかったロックを外す。

モジュール設定の変更は VME モジュールの内部状態を変更する操作で、VME モジュールのレジスタに設定値を書き込むことで行われる。

第3章 宇宙線を用いたNEBULA 性能評価実験

NEBULA の基本性能である時間分解能、位置分解能などを評価するために、宇宙線などを用いてオフライン緒実験を行った。本章ではその実験についての詳細を述べる。

3.1 実験における NEBULA の基本構成

この実験では、NEBULA を1層のみ使用する。更に、その1層のうち半分のみを有効にした状態で性能評価実験を行う。これは性能評価そのものよりもその手法を開発することに力点を置いているためである。実験時の NEBULA の構成は表 3.1 の通り。

種別	名称/型番	単位
プラスチックシンチレータ	BC-408	36
光電子増倍管 (PMT)	R7724ASSY	72
電源フレーム	SY1527LC	1
電源供給ボード	A1535SN	4
ディスクリミネータ	V895	6
コインシデンス	N-RS413	3
Logic ディレイ	RPV-090	3
TDC	V775	3
アナログ (ケーブル) ディレイ	RG174/U	6
QDC	V792	3
VME クレート	8100/04	2
VME クレートコントローラ	618-3	2
I/O レジスタ	RPV-130	1
データ収集用 PC ¹	(nebula01) ²	1

表 3.1: 性能評価実験実施時の NEBULA のシステム構成

3.2 実施した測定

今回の NEBULA の性能評価実験では、大まかに 3 パターンの実験を行った。

1. TDC Calibrator によるモジュール較正
2. 宇宙線の測定
3. ²⁴¹Am-Be 線源の測定

宇宙線の測定は更に、NEBULA 単体での測定と位置較正のための外部検出器との同時測定とを行った。

3.3 TDC Calibrator によるモジュール較正 (ドライラン)

QDC,TDC モジュールは、それ自身にも較正が必要である。

¹NEBULA 全体で 1 台

²ホスト名

QDC の値には、真の電圧積分値に加えてペDESTAL pedestal と呼ばれる値が余計に加わる。NEBULA で使用する CAEN V775QDC には取得した積分値から定数を差し引く機能があるので、前もってペDESTAL の値を測定しておけば、この機能を用いてペDESTAL の影響を除去できる。ペDESTAL の値は、QDC に入力信号を入れない状態で Gate のみを入力すれば取得できる。

また TDC については、TDC から得られる離散値 (ch 値) を実時間に変換するために、Time Calibrator を用いた較正を行って変換関数を求めておく必要がある。

以上 2 つの作業のためのデータは同時に取得できる。つまり、TDC の較正に使う Time Calibrator の START 信号を QDC の Gate に用いればよい。

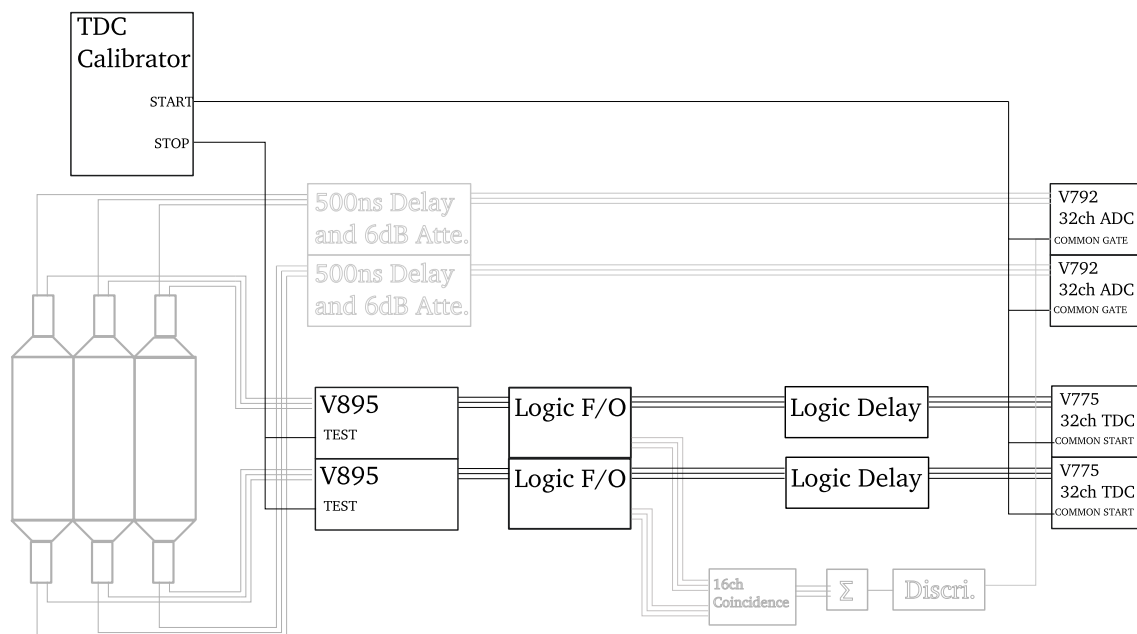


図 3.1: モジュール較正時の回路図。

3.4 NEBULA 単体での宇宙線測定

現在 NEBULA が設置されている場所は理化学研究所 RIBF 棟の地下 2 階であるが、十分な量の宇宙線が到達する。宇宙線のうち NEBULA で検出できる主な成分は μ 粒子 (ミュオン) である。宇宙線ミュオンは幾つかの点で較正に向いている。

1. いついかなる時でも常に利用できる: しかもコストがかからない。
2. 検出効率が高い: ミュオンは荷電粒子なので、電磁相互作用をする。よって検出効率が高い。
3. 速度損失が少ない: 運動エネルギーが非常に高いので、エネルギーを失っても速度が殆ど変わらない。また速度自体も光速 c とほぼ同一視できる。

そこで、測定器較正のための主なイベントソースとして宇宙線を用いた測定を行った。

3.5 外部検出器との宇宙線同時測定

通常の NEBULA の構成では、位置の較正は次の仮定を措いて行う:

- 各シンチレータの位置は揃っていて、かつ正確に設置されていること
- シンチレータの有感領域が物理的なボリュームと一致すること

しかし、実際には配置が完全に正確であることはありえず³、また有感領域と物理的の大きさが一致することはむしろ考えにくい。そこで NEBULA とは別に、外部に位置のリファレンスとなる検出器を配置して、それとのコインシデンス測定を行うことで正確な位置較正を実現することが考えられる。

³実際に、配置後の測定では誤差が確認されている

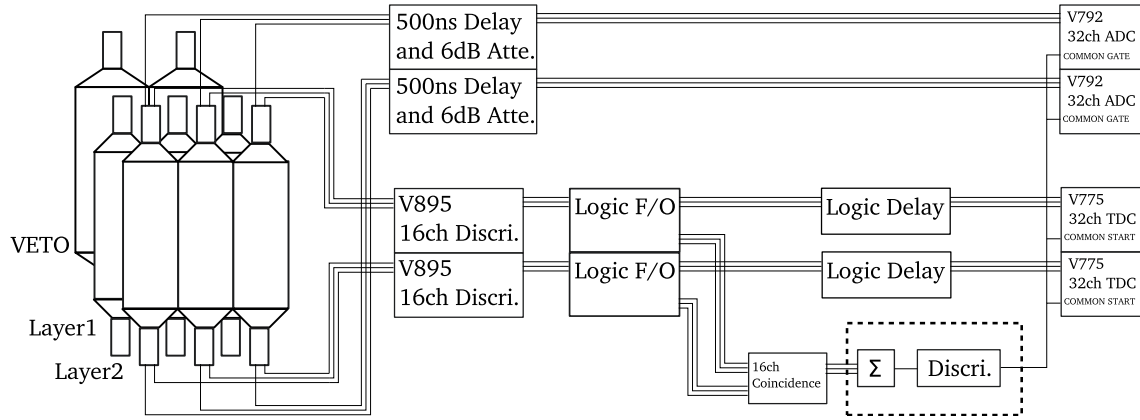


図 3.2: 宇宙線測定時の回路図。点線枠で囲った部分がトリガ生成の核となる部分。Σ は多重加算器

今回は、リファレンスとして大きさが $1085 \times 30.25 \times 30.25\text{mm}$ のプラスチックシンチレータを 4 基用いる。これらを図 3.3 のように配置する。シンチレータの長辺は図の紙面に垂直な方向に向ける。この配置で、例えば図の 1 番と 3 番のシンチレータを共に通過するようなイベントを選び出すと、対応する宇宙線の飛跡は狭い範囲に限定される。

3.6 $^{241}\text{Am-Be}$ 線源の測定

後述するエネルギー較正においては、エネルギー損失の値が把握できるイベントソースが必要になる。宇宙線の測定ではゼロ ch および宇宙線スペクトルのピークの 2 点が得られるが、更にデータ点を増やすために、 γ 線源をイベントソースとした測定を実施した。

この測定で使用した $^{241}\text{Am-Be}$ 線源は強力な γ 線源である。アメリカシウム Am、あるいはポロニウム Po などの α 崩壊する核種と Be を組み合わせると、次の反応により γ 線が発生する：



この 4.43MeV の γ 線のコンプトンエッジを NEBULA で測定することで、エネルギー較正に利用する。

コンプトン散乱における入射波長 λ_i と散乱波長 λ_s の差の式を変形して次を得る：

$$\lambda_s = \lambda_i + \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta) \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \longrightarrow \Delta E &:= E_i - E_s = \frac{hc}{\lambda_i} - \frac{hc}{\lambda_i + \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)} \\ &= E_i \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{E_i}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)} \right) \end{aligned} \quad (3.4)$$

E_i, E_s はそれぞれ入射時と散乱後のエネルギー、よって最後の式の左辺は散乱時のエネルギー損失である。これが最大になるのは真後ろに散乱した場合、すなわち $\theta = -\pi$ の時で、 $E_i = 4.43\text{MeV}$ を代入すると $\Delta E = 4.2\text{MeV}$ を得る。

較正時は、図 3.6 の 130ch 付近に見えるエッジをコンプトンエッジとみなし、フィッティングにより求めたこのエッジの半値点が 4.2MeV に対応すると考える。

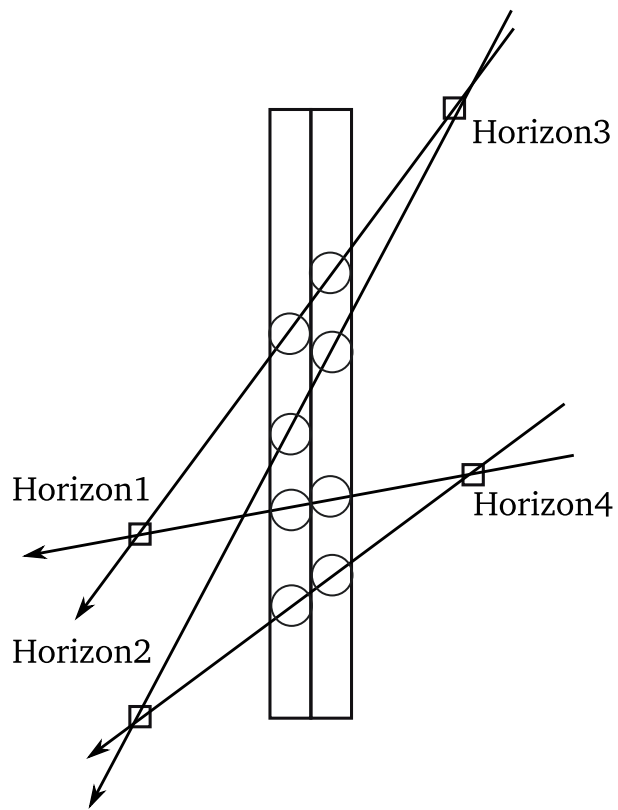


図 3.3: 横置きしたシンチレータによる位置較正

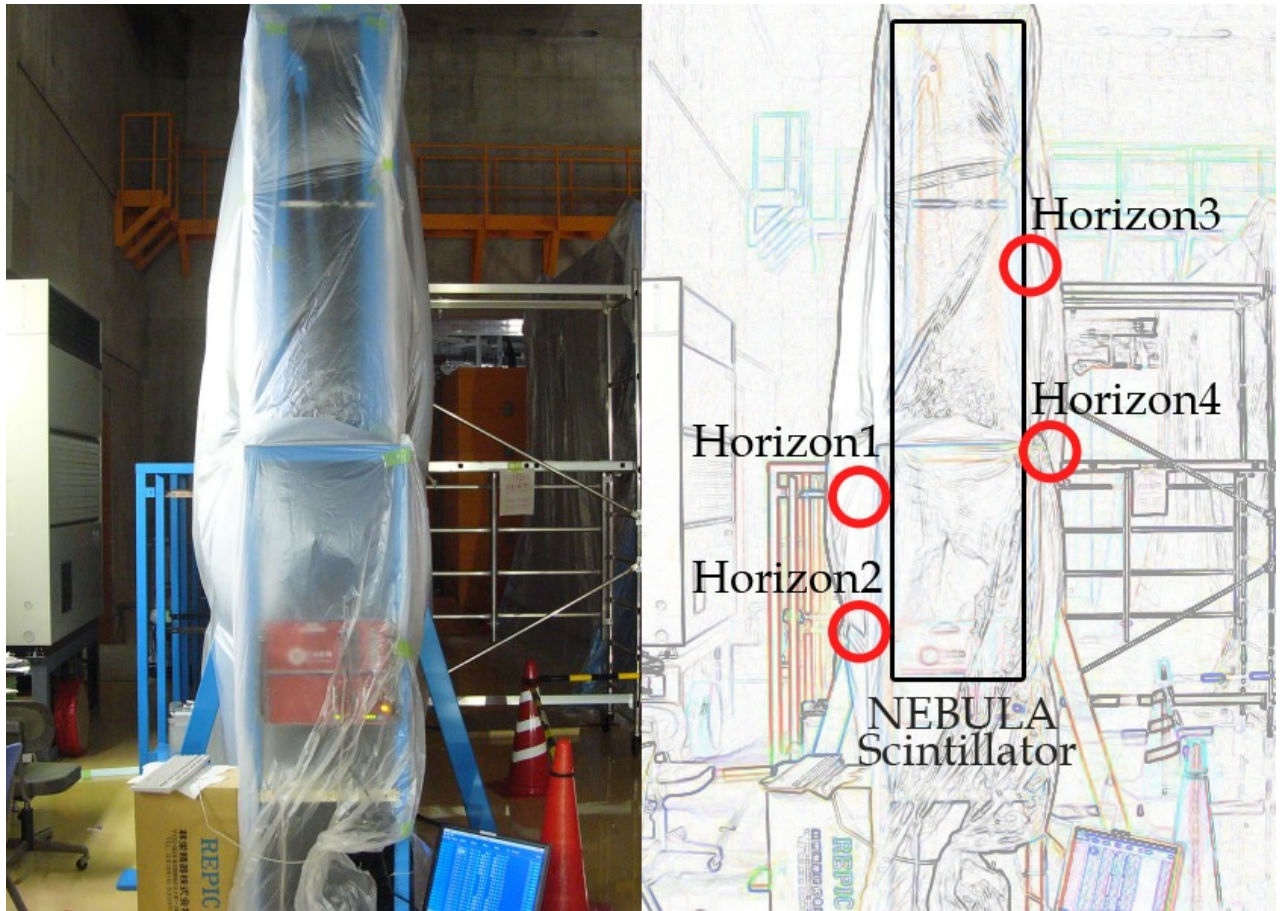


図 3.4: 位置較正用の横置きシンチレータの配置写真。右の図は左の写真を加工したもので、赤丸が4つの横置きシンチレータのおおよその位置を表す。Horizon3 は NEBULA シンチレータの上端とほぼ同じ高さにある (床から約3メートル)。



図 3.5: $^{241}\text{AmBe}$ 線源 (中央) およびコリメーション用の鉛ブロック。上方の黒い部分は NEBULA シンチレータ (遮光シートの黒)

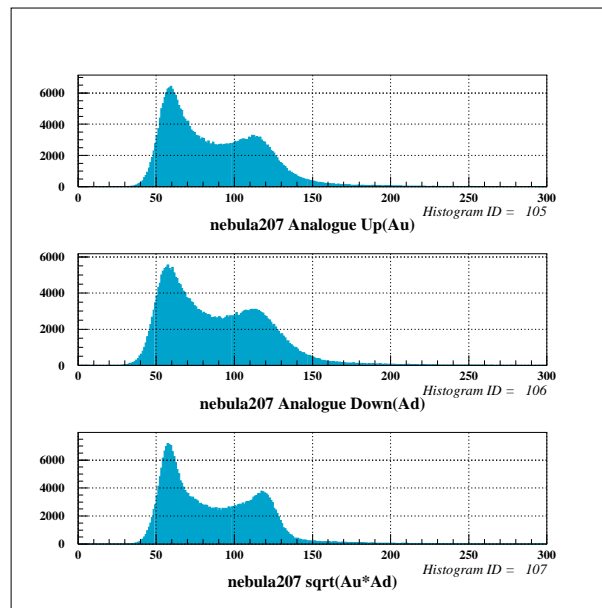


図 3.6: AmBe 線源が発する 4.43MeV の γ 線による、ID208 のシンチレータのアナログスペクトル。横軸は QDC から取得したアナログ情報 (ch)。上中図は上下それぞれ単独の、下図はそれらの相乗平均のスペクトル。130ch 付近がコンプトンエッジ。

第4章 実験データの解析と較正

本章では、NEBULA 性能評価実験により得られた基本データからより重要な物理量を導く解析手法、及びその誤差の修正である較正について述べる。また実際に解析と較正を行って得た結果についても述べる。

4.1 キャリブレーション (較正) の流れ

本章の以後の部分で述べる各種の較正を行う順序を図 4.1 に示す。エネルギー較正以降の 3 つの作業は互いが互いの結果に影響しあう。特に位置と時間の較正は互いの依存性が強いので、2 つの較正を交互に繰り返すことで結果の向上を図る。

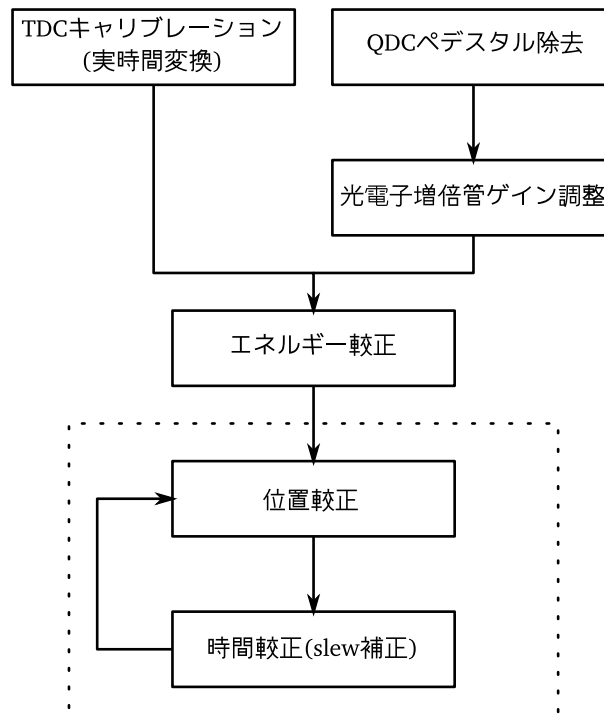


図 4.1: 較正のフローチャート。点線枠の部分は相互に依存するので繰り返し行う。

4.2 NEBULA で測定される物理量

4.2.1 基本測定量 (Raw データ)

我々が直接取得できるデータは、各シンチレータの 1) タイミング情報と 2) アナログ情報である。NEBULA から得られる全ての物理量は、この 2 つの測定量からの誤差を受ける。2 つの量の分解能をそれぞれ $\sigma_{A_{u/d}}$, $\sigma_{t_{u/d}}$ と記す。

NEBULA を構成する 72 基のシンチレータの上下それぞれには光電子増倍管 (PMT) が取り付けられている。1 つの PMT は 2 系統の信号を出力するが、これらは同等のものである。片方は Logic 信号に変換した後積分し、タイミング情報とする。もう一方はそのまま積分してアナログ情報となる。

タイミング情報

タイミング情報の生成にはTDCを使用する。TDCは、StartとStopの2つのLogic信号の時間間隔を0-4095(12bit)の離散値として取得する。各PMTが出力するタイミング信号をDiscriminatorでLogic化したものをStop信号とする。またStart信号は、実際のオンライン実験の際には外部から与えられるが、今回のようにNEBULA単体で動作する場合はNEBULA内で生成されたトリガ信号を用いる。本論文中の測定では、後述のTDCキャリブレーション

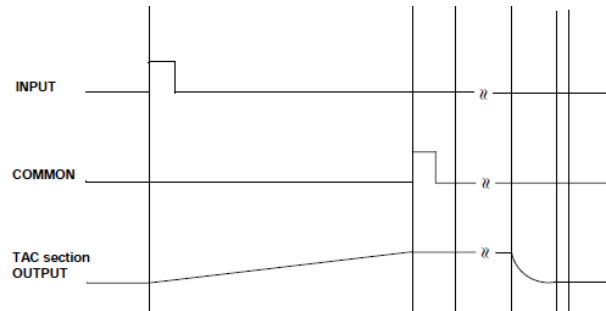


図 4.2: TDC 入力信号と出力信号の関係 (CAEN V775 User Manual より抜粋して転載)

ンの場合を除いて、'マルチプリシテイトリガ'を採用している。すなわち、 M を定数として、一定時間内に M 体以上の検出器が¹タイミング信号を発生した場合にトリガ信号を生成する。

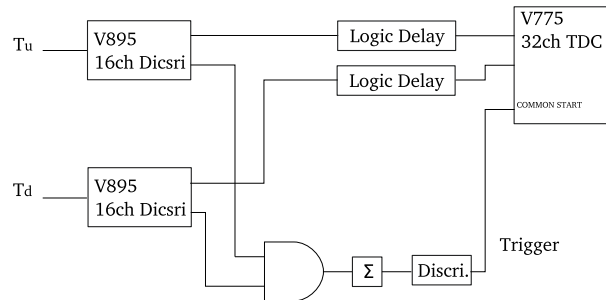


図 4.3: タイミング情報を生成するための回路。入力信号 (T_u, T_d) は、同じシンチレータに対応する上下のタイミング信号。

アナログ情報

アナログ情報の生成にはQDCを使用する。QDCは、入力信号の電圧を時間積分し、それを0-4095(12bit)の離散値として取得する。積分はGateと呼ばれるLogic信号が入力されている間だけ実行される。電圧 V と電流 I はOhmの法則より $V = IR$ の関係で結ばれる。よって抵抗 R が既知ならば、電圧の時間積分は

$$\int_0^t V dt = R \int_0^t I dt = RQ_{0 \rightarrow t} \quad (4.1)$$

として、時刻0から t までの間にQDCに入った電荷 $Q_{0 \rightarrow t}$ とみなすことができる。電荷は信号中の電子の数を表す。PMT出力信号に含まれる電子の数はPMTの電子増倍管に入射した光電子の数に比例²する。光電子の数はPMTの光電面に入射した光子の数に、また光子の数は励起されたシンチレータ構成分子の数³に、そして励起された分子の数はシンチレータ中でのエネルギー損失にそれぞれ比例するので、アナログ情報は結局シンチレータ中でのエネルギー損失に比例することになる。

¹「PMTが」ではないことに注意。トリガ信号を作る際には、同じ検出器に対応するPMTの信号はANDで1つにまとめる。

²このときの比例係数 μ をそのPMTのゲインと呼ぶ。詳細は後述。

³シンチレータ中での減衰を考えない場合

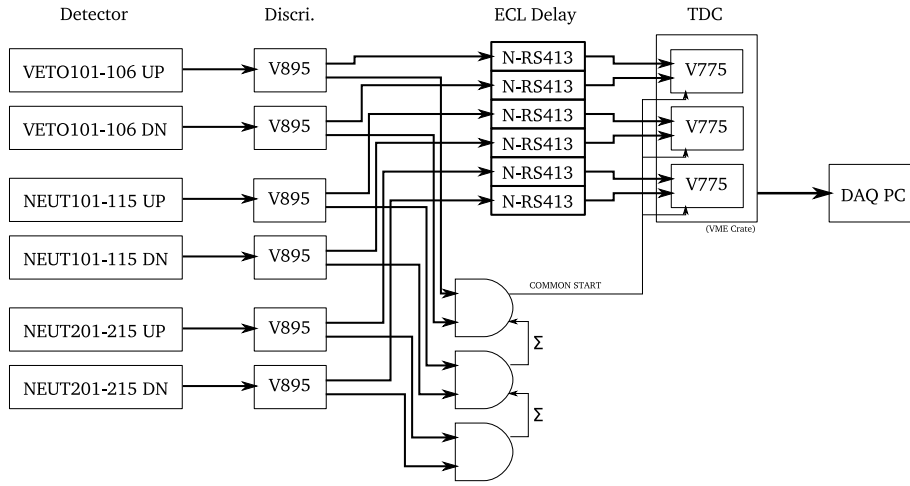


図 4.4: 現在動作可能な部分すべてにわたるタイミング生成回路

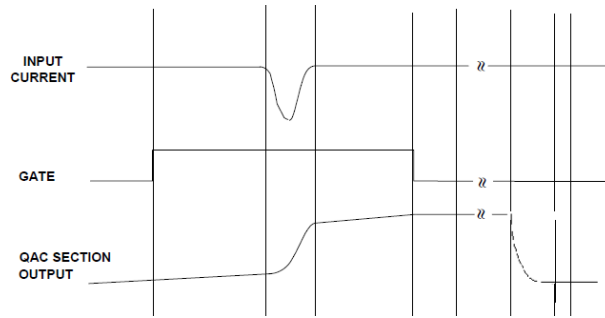


図 4.5: QDC 入力信号と出力信号の関係 (CAEN V792 User Manual より抜粋して転載)

4.2.2 Raw データから導かれる物理量

衝突位置 (x, y, z)

粒子が NEBULA に衝突した位置の座標 (x, y, z) は次のようにして決められる。

- x : 衝突したシンチレータの位置。複数衝突の場合はトラッキングで尤もらしい飛跡を求めてから逆算。分解能はシンチレータと同じ幅を持つ矩形分布に等しいとする： $\sigma_x \sim \frac{60}{\sqrt{3}} = 34.6\text{mm}$.
- y : 衝突したシンチレータのタイミング情報から決める： $y = c_S(t_d - t_u) + y_S$.
よって分解能は時間分解能に依存し、 $\sigma_y \sim c_S \sqrt{\sigma_{t_d}^2 + \sigma_{t_u}^2}$
- z : NEBULA の検出面の位置。
分解能は x と同様： $\sigma_z \sim 34.6\text{mm}$.

衝突角度 θ

ビーム中心軸と NEBULA に入射した粒子の速度ベクトルとの間の角度を衝突角度 θ とする。前述の座標の定義をもちいると、 θ の正確な定義は次のようになる：

$$\theta := \arctan \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z} \quad (4.2)$$

しかし、NEBULA のアクセプタンスは最大で片側 0.4 ラジアン程度で、ここでは $\theta \sim \tan \theta$ の近似がまだ成り立

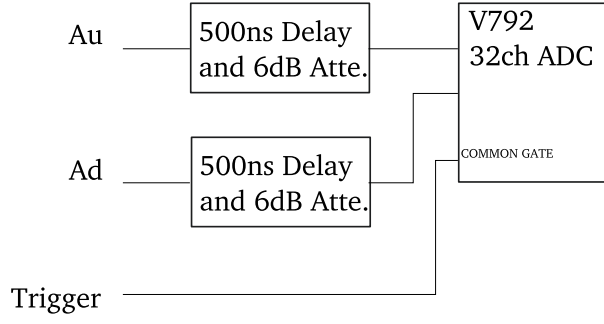


図 4.6: アナログ情報を生成するための回路。入力信号 (A_u, A_d) は、同じシンチレータに対応する上下のアナログ信号。また Trigger は、図 4.3 の Trigger と同じ信号。

つ。よって、 θ は近似により

$$\theta \sim \tan \theta = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z} \quad (4.3)$$

$$\rightarrow \delta\theta \sim \frac{1}{L\sqrt{x^2 + y^2}} (x\delta x + y\delta y) - \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z^2} \delta z \quad (4.4)$$

$$\sigma_\theta^2 = \frac{1}{L^2(x^2 + y^2)} (x^2\sigma_x^2 + y^2\sigma_y^2) + \frac{x^2 + y^2}{z^4} \sigma_z^2 \quad (4.5)$$

ただし、 x, y が $\pm 2\text{m}$ 程度であるのに対し $z \sim 10\text{m}$ なので、 z^{-4} がかかる誤差の σ_z^2 の項は無視できる。

式 (4.5) から、 $\sigma_x \sim \sigma_y$ ならば $\sigma_\theta^2 \sim \frac{\sigma_x^2}{L^2}$ となる。また $\sigma_x \ll \sigma_y$ であれば、 $\sigma_\theta^2 = \frac{y^2\sigma_y^2}{L^2(x^2 + y^2)}$ となる。 $L \sim 10\text{m}$ 、 $\sigma_x = 35\text{mm}$ とすると、前者の場合は $\sigma_\theta = 35/10000 = 3.5\text{mrad}$ となる。

エネルギー損失 ΔE

粒子があるシンチレータ中で失ったエネルギーはアナログ情報から決まる。アナログ情報は、元をたどればシンチレータの発光量に比例する。光子は物質中で指数的に減衰するが、減衰の程度 (減衰長) は物質固有と考えてよいので、次のように書くことができる：

$$A_u = A_0 \exp\left(-\frac{H/2 - y}{\lambda}\right) \quad (4.6)$$

$$A_d = A_0 \exp\left(-\frac{H/2 + y}{\lambda}\right) \quad (4.7)$$

$$\rightarrow A_u \times A_d = A_0^2 \exp\left(-\frac{H}{\lambda}\right) = \text{const.} \quad (4.8)$$

$$A^* := \sqrt{A_u A_d} = A_0 \exp\left(-\frac{H}{2\lambda}\right) \quad (4.9)$$

A_0 は減衰無しのアナログ、 H はシンチレータの高さ。また y の原点はシンチレータの中心とする。最後に定義した量 A^* は、発光がシンチレータの中心で起きたと仮定したときのアナログ情報を表す。この A^* を、予め測定しておいたキャリブレーション情報を用いてエネルギーに変換する。

粒子の速さ v_N

衝突粒子の速さ v_n は、(粒子の移動距離)/(粒子の移動時間) : L/t_{TOF} で求められる：

$$\delta v_n = \frac{\delta L}{t_{\text{TOF}}} - \frac{L\delta t_{\text{TOF}}}{t_{\text{TOF}}^2} \quad (4.10)$$

$$\rightarrow \sigma_{v_n}^2 = \frac{1}{t_{\text{TOF}}^2} \sigma_L^2 + \frac{L^2}{t_{\text{TOF}}^4} \sigma_{t_{\text{TOF}}}^2 \quad (4.11)$$

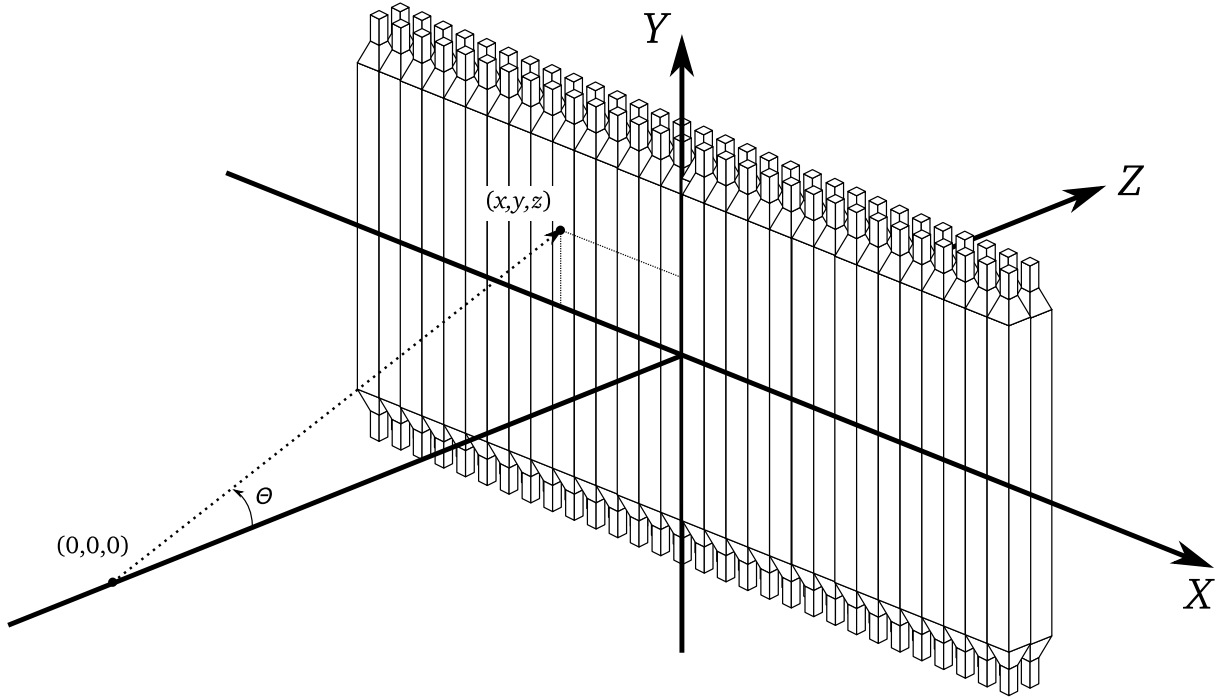


図 4.7: NEBULA の検出器面とビーム座標系との関係。原点は中性子の放出点 (= 標的位置)。 z 軸はビーム中心軸に一致し、 x, y 軸は NEBULA アレイの検出面に平行にとる。衝突角度 θ はビーム軸に対する速度ベクトルの角度とする。

移動距離は衝突位置を使って $L = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 。よって分解能は、

$$\delta L = \frac{x\delta x + y\delta y + z\delta z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \quad (4.12)$$

$$\rightarrow \sigma_L^2 = \frac{1}{x^2 + y^2 + z^2} (x^2\sigma_x^2 + y^2\sigma_y^2 + z^2\sigma_z^2) \quad (4.13)$$

$z > 10\text{m}$ であるのに対し $|x| < 1.8\text{m}$, $|y| < 0.9\text{m}$ なので、分子分母で z が卓越し $\sigma_L^2 \sim \frac{z^2\sigma_z^2}{z^2} = \sigma_z^2$ 。

移動時間はビームラインからの時間情報とシンチレータのタイミング情報の差から求めるが、多少込み入った手順を要する。時間原点を、標的においてビームから衝突粒子が生成された瞬間とする。衝突粒子は、まず 1) 標的からシンチレータまで飛行してシンチレータを光らせる。そして 2) 生成された光がシンチレータ中を速さ c_S で上下に移動して検出されるが、この時の光の移動距離は、アナログのときと同じで上下それぞれ $H/2 - y, H/2 + y$ 。よって、1) にかかる時間を t_1 とすると、 $t_u = t_1 + (H/2 - y)/c_S, t_d = t_1 + (H/2 + y)/c_S$ となるので、 $t^* := \frac{t_u + t_d}{2} = t_1 + H/2c_S$ となり、 y に依存しなくなる。知りたいのは $t_1 =$ 飛行時間 t_{TOF} なので、

$$t_{\text{TOF}} = t^* - \frac{H}{2c_S} = \frac{t_u + t_d}{2} - \frac{H}{2c_S} \quad (4.14)$$

$$\rightarrow \sigma_{t_{\text{TOF}}}^2 = \frac{1}{4} (\sigma_{t_u}^2 + \sigma_{t_d}^2) \quad (4.15)$$

まとめると、

$$v_n = \frac{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}{\frac{t_u + t_d}{2} - \frac{H}{2c_S}} \quad (4.16)$$

$$\sigma_{v_n}^2 = \frac{1}{L^2 t_{\text{TOF}}^2} (x^2\sigma_x^2 + y^2\sigma_y^2 + z^2\sigma_z^2) + \frac{L^2}{4t_{\text{TOF}}^4} (\sigma_{t_u}^2 L\sigma_{t_d}^2). \quad (4.17)$$

粒子の運動量 \mathbb{P}_n とエネルギー E_n

衝突粒子の運動量 p_n とエネルギー K_n は速度 v_n から計算する。

まず運動量 (の大きさ) は、

$$p_n = m_n \frac{v_n}{\sqrt{1 - \frac{v_n^2}{c^2}}} \quad (4.18)$$

$$\rightarrow \delta p_n = \frac{m_n}{\sqrt{1 - \frac{v_n^2}{c^2}}^3} \delta v_n \quad (4.19)$$

$$\sigma_{p_n}^2 = \frac{m_n^2}{\left(1 - \frac{v_n^2}{c^2}\right)^3} \sigma_{v_n}^2 \quad (4.20)$$

全エネルギーは

$$E_n = \sqrt{p_n^2 + m_n^2} \quad (4.21)$$

$$\rightarrow \delta E_n = \frac{p_n \delta p_n}{\sqrt{p_n^2 + m_n^2}} \quad (4.22)$$

$$\sigma_{E_n}^2 = \frac{p_n^2}{p_n^2 + m_n^2} \sigma_{p_n}^2 = \frac{p_n^2}{p_n^2 + m_n^2} \frac{m_n^2}{\left(1 - \frac{v_n^2}{c^2}\right)^3} \sigma_{v_n}^2 \quad (4.23)$$

運動エネルギーは $E_n - m_n$ なので、誤差は全エネルギーと同じである。

相対エネルギー E_{rel}

相対 (運動) エネルギー E_{rel} は、「重心系における各粒子の運動エネルギーの総和」である。
粒子 1, 2 が相対運動を行っているとする。各々の運動量は、向きが逆で絶対値が等しい。このとき、

$$E_{\text{rel}} = \sqrt{m_1^2 + P_{\text{rel}}^2} - m_1 + \sqrt{m_2^2 + P_{\text{rel}}^2} - m_2 \quad (4.24)$$

NEBULA では、粒子 1,2 はそれぞれ残留核 R と中性子 n となるので、

$$E_{\text{rel}} = \sqrt{m_R^2 + P_{\text{rel}}^2} - m_R + \sqrt{m_n^2 + P_{\text{rel}}^2} - m_n \quad (4.25)$$

相対エネルギーの誤差は次式のようになる：

$$\delta E_{\text{rel}} = \left(\frac{1}{\sqrt{m_R^2 + P_{\text{rel}}^2}} + \frac{1}{\sqrt{m_n^2 + P_{\text{rel}}^2}} \right) P_{\text{rel}} \delta P_{\text{rel}} \quad (4.26)$$

$$\rightarrow \sigma_{E_{\text{rel}}}^2 = \left(\frac{1}{\sqrt{m_R^2 + P_{\text{rel}}^2}} + \frac{1}{\sqrt{m_n^2 + P_{\text{rel}}^2}} \right)^2 P_{\text{rel}}^2 \sigma_{P_{\text{rel}}}^2 \quad (4.27)$$

$$(4.28)$$

相対運動量 P_{rel} とその誤差は、

$$P_{\text{rel}} = |P_n - P_0/2| = \sqrt{P_n^2 + \frac{P_0^2}{4} - P_n P_0 \cos \theta} \quad (4.29)$$

$$\sigma_{P_{\text{rel}}}^2 = \frac{1}{P_{\text{rel}}^2} \left((P_n - P_0 \cos \theta)^2 \sigma_{P_n}^2 + (P_0/4 - P_n \cos \theta)^2 \sigma_{P_0}^2 + (P_n P_0/4)^2 \sigma_{\theta}^2 \right) \quad (4.30)$$

4.3 データの解析と補正

各々の補正はおおよそ記述した順番で行われるが、一部の補正はその結果が相互に依存しているため、それらについては一連の補正を繰り返して行う。詳しくは後述する。

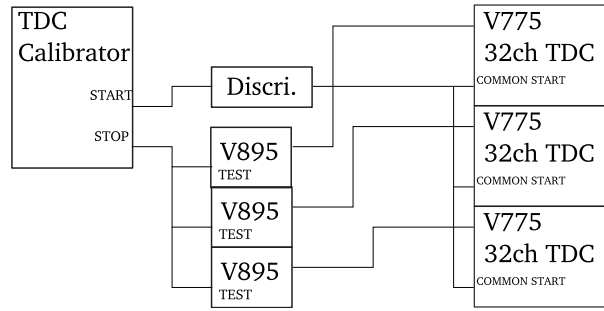


図 4.8: TDC キャリブレーション (実時間変換) を行うための回路。

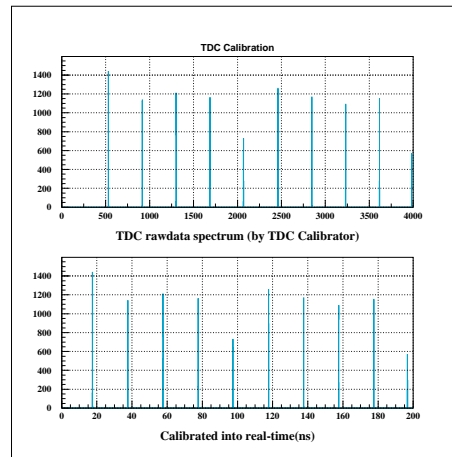


図 4.9: Calibrator 信号のスペクトル (上) および実時間への変換結果 (下)。隣り合うピークの間隔がおおよそ 20ns になっている。

4.3.1 タイミング情報の実時間化 (TDC キャリブレーション)

タイミング情報の積分に用いる TDC は、タイミング信号の積分結果を 4096ch のデジタル値として取得する。この値 (ch 値) を実時間に直す変換を求めるために、長さ (duration) が正確に判っている信号を積分させる。

このキャリブレーション用の信号には Time Calibrator と呼ばれるモジュールを用い、これに長さが 20ns の整数 (n) 倍となる信号を発生させる。 n がいくつになるかはランダムに決まる。キャリブレーション時の回路を図 4.8 に示す。

キャリブレーション信号を TDC に入力して ch 値のスペクトルを見ると、ある間隔を置いて非常に鋭いピークが立つ。隣り合うピークの間隔は、実時間で言うと 20ns に対応するものである。そこで、ピーク位置 (ch) を x 、対応する実時間 (ns) を y として、 $f: x \mapsto y$ となる変換 f をフィッティングにより求める。Calibrator によるスペクトルとその較正結果を図 4.9 に示す。

4.3.2 QDC ペDESTALの除去

QDC による電荷積分値には、シグナルの有無に依らない値 (ペDESTAL) が系統的に含まれる。これは QDC 内部の積分回路に流れる微弱な電流に依るもので、この電流によって、図 4.5 に示されるように、OUTPUT は INPUT の有無に係わらず一定の大きさで増加する。これが出力されるアナログ情報に含まれていると、後述するエネルギー較正の精度低下やアナログ情報のダイナミックレンジ減少などの悪影響がもたらされる。NEBULA で使用する CAEN V792QDC には、モジュール全体の積分回路に逆向き電流 (I_{PED}) を印加する機能および電荷積分値から ch 毎にオフセット (THE) を差し引く機能がある。これらを用いてペDESTALを抑制する。

I_{PED} は、そのモジュールから得られるアナログ値に一律なオフセットを与える。オフセットの大きさは I_{PED} に大まかに比例する。比例関係が成り立たない領域では適正な効果を発揮しないので、 I_{PED} の大きさは注意して設定する。

0. QDC の INPUT には何も接続しない

1. 適当なトリガを QDC の GATE に入力
2. QDC から得られるアナログ値のスペクトルを見る
3. 鋭いピークが見えるので、読み取ったピークの中心値/2 をその ch の THE 値とする。

除去作業前後でのペDESTALの状態を図 4.11 に示す。

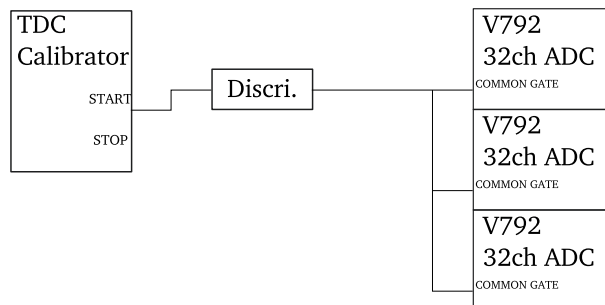


図 4.10: QDC のペDESTALを測定する為の回路。右の QDC にはゲートのみを与える。

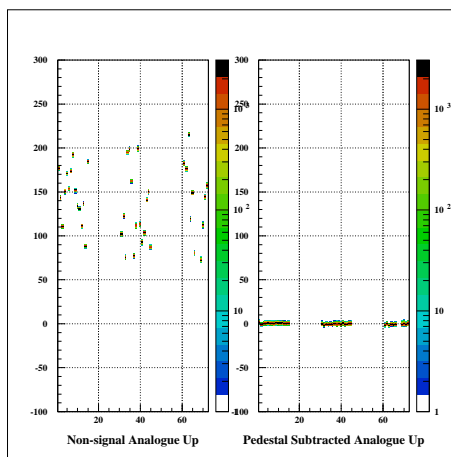


図 4.11: QDC ペDESTAL。TDC Calibrator からの信号を GATE として INPUT 無しの積分値を取得。左はペDESTAL除去前、右は除去後。いずれの図も、横軸は PMT の ID、縦軸はアナログ情報 (ch)

4.3.3 PMT 印加電圧の調整 (PMT ゲインの調整)

PMT は、光電面に入射した光電子を増倍管で増幅して取り出す装置である。増倍管への入力電流 (=光電子流束) と出力電流の比 (増幅率) はゲイン (gain) と呼ばれる。ゲインは、最終的に得られるアナログスペクトルのスケールを決めるので、もしゲインが低すぎればエネルギー分解能に悪影響を与えるし、逆に高すぎると高エネルギー側が測定レンジを外れてしまうので、ゲインは適切に設定する必要がある。後々エネルギー較正を行うときにことも考えると、ゲインは「全ての中性子検出器のアナログスペクトルの形が同じ」になるように設定するのが望ましいと考えられる。

ここでは、「形が同じ」を「ピークの位置が同じ」と考える。ゲイン調整時は QDC のペDESTALは除去されており、また宇宙線をイベントソースとして用いるので使用できるピークは 0MeV および宇宙線ピークの 30MeV の 2 つである。0MeV に対応するアナログ情報は 0ch、また中性子検出器のエネルギー損失のダイナミックレンジを 150MeV とすると、30MeV に対応するアナログ情報は 830ch に来ると考える。以上を前提にして、以下の手順で印加電圧の調整を行う：

1. 全ての中性子検出器の PMT に同じ電圧 V_2 を印加 (実施時 1500V) し、宇宙線をイベントソースとして 1-2 時間程度測定する。
2. 各 PMT 毎にアナログスペクトルを見て、宇宙線ピークの ch 値を記録 (x_2) する。

3. (1) で加えた電圧の $-100V(V_1)$, および $+100V(V_3)$ の値で電圧を印加して同様に 1-2 時間程度測定する。
4. 得られたスペクトルから宇宙線ピークの ch 値を記録する (x_1, x_3) 。
5. 得られた値 V_i, x_i を式 $\log V = p_1 + p_2 \log x + p_3(\log x)^2$ に代入し、 p_1, p_2, p_3 をパラメータとしてフィッティングを行う。得られた式を $V = V(x)$ と書く。
6. $x = 830$ として各 PMT 毎に $V(830)$ を計算する。得られた値がその PMT に印加すべき電圧となる。
7. 計算された印加電圧を実際に印加して 1-2 時間の測定を行う。
8. 結果を確認して手動で微調整。

最後の微調整はほとんどの場合必要ないか、必要だとしても 1 回で良い。

なお、フィットに使用する式は、PMT のゲインに関する次の式から導かれる：

$$\mu = KV^{\alpha n} \quad (4.31)$$

μ は PMT のゲイン、 V は PMT への印加電圧で、 K, α はパラメータである。 n はその PMT のダイノード段数で、NEBULA では $n = 10$ となる (表 2.3 参照)。この式に従えば、 x と V の関係は両対数グラフ上で線形となるが、フィット時には誤差を考慮して 2 次の項を含めている。

4.3.4 エネルギーの較正

式 (4.9) によると、同じシンチレータの上下のアナログ情報の相乗平均は QDC から得られるアナログ値を、対応するシンチレータ内でのエネルギー損失に変換する関数を求める。これには、TDC キャリブレーションと同様に、エネルギー損失が既知のイベントから得られるアナログ値を用いてフィッティングにより変換関数を求める。

本論文では以下の条件でフィッティングを行う：

イベント	エネルギー
QDC ゼロ点	0
γ 線 (4.33MeV) のコンプトンエッジ	4.2MeV
宇宙線 (ミュオン) のピーク	30MeV

表 4.1: QDC 較正に用いるイベント

γ 線のスペクトルと宇宙線のスペクトルは同時に測定できないので、別々の Run で測定したスペクトルからピークを読み取って別途フィッティングを行う。

γ 線コンプトンエッジの同定

3.6 節 $^{241}\text{AmBe}$ 線源は、生成する ^{12}C が励起状態から落ちる際に 4.43MeV の γ を放出する。この γ は中性子検出器のシンチレータと相互作用を行ってエネルギーを失うが、4-5MeV 程度のエネルギー領域ではコンプトン散乱が支配的な過程となる (図 3.6)。コンプトン散乱のエネルギー損失スペクトルは Klein-仁科の公式に従うが、およそ「最大エネルギー付近で極大になった後急激に落ちる」という形をしている。エネルギー損失の最大点は、式 (3.4) から $\theta = -\pi$ (後方散乱) の時とわかり、 $E_i = 4.43\text{MeV}$ の場合は 4.2MeV となる。エネルギー較正に用いるために、この各中性子検出器ごとに最大点の位置をアナログスペクトルから読み取る方法を考える。

コンプトン散乱スペクトルの最大点付近 (コンプトンエッジ) は図 4.12 の上に見られるような形をしているが、これを Gauss 関数と 2 次関数の和でフィットする：

$$f(x) = p_1 \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-p_2}{p_3}\right)^2\right) + p_4 + p_5x + p_6x^2 \quad (4.32)$$

結果は図 4.12 の下のようなになる。このうち Gauss 関数部分の寄与が主要であると考え、Gauss 関数が半値に落ちる点をコンプトンエッジと考える。Gauss 関数の半値半幅は $\sqrt{2\ln 2} \times p_3$ なので、得られるコンプトンエッジの位置は $p_2 + \sqrt{2\ln 2} \times p_3$ で、図 4.12 のフィット結果を用いると 128 付近となる。

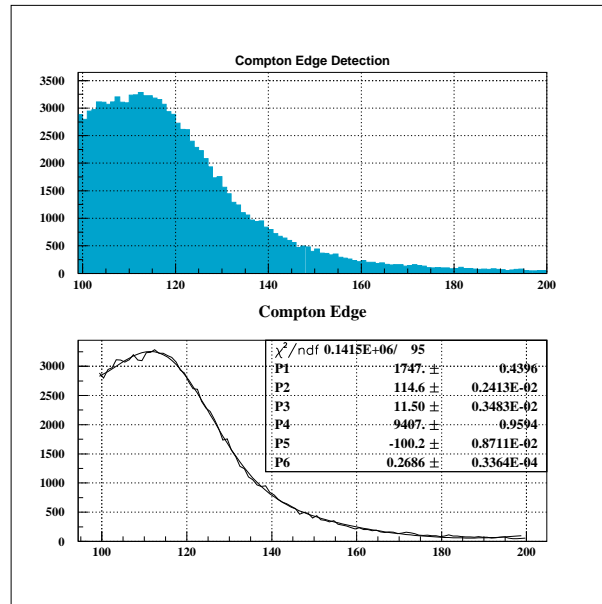


図 4.12: $^{241}\text{AmBe}$ 線源のコンプトンエッジ (上) とそのフィット結果 (下)。

宇宙線エネルギー損失ピークの同定

シンチレータに入射する宇宙線は、その通過距離にほぼ比例するエネルギーをシンチレータ中で失う。エネルギー損失のスペクトルは宇宙線の角度分布およびシンチレータの形状、配置に複雑に依存するが、ある値にピークを持つ。これらの雑多な条件を考慮したコンピュータシミュレーションから得られたスペクトル [3] は、実際に NEBULA で宇宙線を測定して得られるアナログスペクトルと同じ形を持つ (図 4.13)。

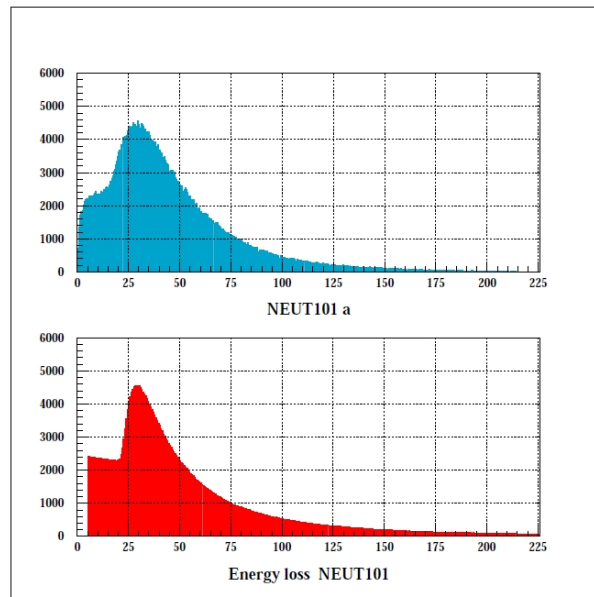


図 4.13: 宇宙線検出器シミュレータによる NEBULA 中性子検出器 (ID=101) におけるエネルギー損失のスペクトル (下段) および実測結果 (上段)

そこで、シミュレータの出力するスペクトルが正しいと考えて、シミュレータから得られるピークのエネルギーを NEBULA における宇宙線ピークのエネルギーとして用いることにする。ピークを求める際は、エネルギー損失

が Landau 分布に、バックグラウンドが一次関数⁴に従うと考えて次の関数によりフィットを行う:

$$f(x) = p_1 \exp\left(-\frac{x - p_2}{p_3} - \exp\left(-\frac{x - p_2}{p_3}\right)\right) + p_4 + p_5 x \quad (4.33)$$

結果は図 4.14。

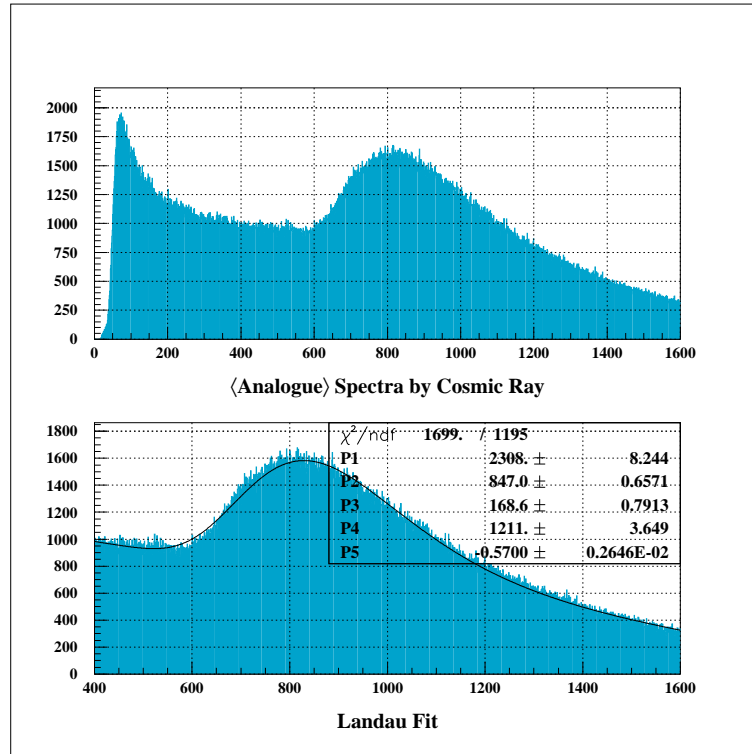


図 4.14: 宇宙線測定時のアナログスペクトル(上)とそのフィット結果(下). フィット関数は Landau 分布と一次関数の和。

ピーク同定の結果

4.3.5 位置の較正

同じシンチレータの上下のタイミング情報の差 $t_d - t_u$ は、式 (4.48) から次のように書ける:

$$dt := t_d - t_u = \frac{2y + H}{v} \quad (4.34)$$

すなわち上下の時間差 dt と位置 y は線形関係にある。NEBULA の中性子検出用シンチレータの鉛直寸法は 1800mm なので、理想的には $-900\text{mm} \leq y \leq +900\text{mm}$ ⁵ となる。よって各シンチレータ毎に $-900 \leq f(dt) \leq +900$ となるような変換 f を求めれば、これがそのまま y 位置となる。

この手法は簡便ではあるが問題点が多く、正確な位置としては使用できない。まず、シンチレータの有感領域が 1800mm いっぱいであるとは考えにくい。また得られる y 位置は個々のシンチレータ自体に「貼りついた」相対座標系での位置であり、NEBULA 全体の座標での位置(絶対位置)は正確には分からない。

そこで、位置分解能が良く絶対位置が分かっている検出器との同時計測により絶対位置の較正を行う。詳細は 3.5 に記述したのでここでは概略のみに留めるが、NEBULA の検出面を挟み込むように設置した 4 基の細いシンチレータと NEBULA との同時計測を行う。

図 4.15 の較正用シンチレータを以下 Horizon1,2,3,4 と呼ぶことにする。番号は図に倣う。Horizon から NEBULA を挟むようにして 2 つを指定してコインシデンスゲートをかけると、宇宙線の軌跡は 2 つの Horizon が作る平面に限定される。本論文における位置較正では、1)Horizon1 と Horizon3, 2)Horizon2 と Horizon3,3)Horizon1 と Horizon4, 4)Horizon2 と Horizon4 の 4 通りのゲートを用いて位置較正を行った。

⁴このようになる領域を選ぶ。

⁵図 4.22 の定義とはオフセットが異なることに注意

ID	0MeV	4.2MeV	30MeV	ID	0MeV	4.2MeV	30MeV
101	0	127.51	842.8	201	0	126.24	838.9
102	0	126.39	846.3	202	0	129.17	852.3
103	0	129.26	851.7	203	0	127.30	849.0
104	0	127.91	847.0	204	0	128.66	858.5
105	0	127.03	844.0	205	0	127.53	850.1
106	0	128.43	850.8	206	0	131.74	877.5
107	0	124.95	826.2	207	0	128.60	852.7
108	0	129.22	843.4	208	0	130.34	847.1
109	0	128.36	848.6	209	0	142.58	921.3
110	0	127.02	851.0	210	0	126.52	838.9
111	0	123.38	816.1	211	0	126.39	840.8
112	0	127.79	847.1	212	0	128.91	853.9
113	0	119.28	799.2	213	0	126.31	831.3
114	0	133.69	880.2	214	0	128.04	846.5
115	0	128.72	853.4	215	0	124.32	835.2

表 4.2: 各中性子検出器のエネルギー較正点 (ch)

位置較正の手順

1. ゲート (Horizon1 \otimes Horizon3) \oplus (Horizon2 \otimes Horizon3) \oplus (Horizon1 \otimes Horizon4) \oplus (Horizon2 \otimes Horizon4) を定義する。
2. 各シンチレータ毎に、上記のゲートをかけた時間差 dt のスペクトルを見る
3. dt スペクトルに 4 つのピークが見えるので (図 4.16)、それぞれの中心値を求める (dt_1, dt_2, dt_3, dt_4)。
4. NEBULA と Horizon の位置から宇宙線と NEBULA との交点をゲート毎に計算する (y_1, y_2, y_3, y_4)。
5. 4 点 (dt_i, y_i) ($i = 1, 2, 3, 4$) を通る関数 $y = f(dt)$ を求める。この関数が時間差から位置への変換となる。

図 4.17 に、この作業の実施前と実施後との比較を示した。実施前 (左) の y は式 (4.34) から得られるものである。

位置較正の分解能見積り

宇宙線粒子が直進するならば、その軌跡の式は

$$y = ax + b \quad (4.35)$$

$$\rightarrow \sigma_y^2 = x^2\sigma_a^2 + a^2\sigma_x^2 + \sigma_b^2 \quad (4.36)$$

と書ける。NEBULA のシンチレータにヒットしたときの y 位置が知りたいので、 σ_x としては NEBULA の x 位置分解能 (34.6mm) を用いる。

いま、Horizon1 \otimes Horizon3 ゲートを考える。それぞれの座標を $(x_1, y_1), (x_3, y_3)$ とすると、ゲートを通る軌跡では、パラメータ a, b は次式で与えられる：

$$a = \frac{y_3 - y_1}{x_3 - x_1} \quad (4.37)$$

$$\rightarrow \sigma_a^2 = \frac{1}{(x_3 - x_1)^2} (\sigma_{y_3}^2 + \sigma_{y_1}^2 + a^2 (\sigma_{x_3}^2 + \sigma_{x_1}^2)) \quad (4.38)$$

$$b = \frac{y_1 x_3 - y_3 x_1}{x_3 - x_1} \quad (4.39)$$

$$\rightarrow \sigma_b^2 = \frac{1}{(x_3 - x_1)^2} (x_3^2 \sigma_{y_1}^2 + x_1^2 \sigma_{y_3}^2 + (y_1 - b)^2 \sigma_{x_3}^2 + (y_3 - b)^2 \sigma_{x_1}^2) \quad (4.40)$$

Horizon の座標に関する分解能は Horizon の大きさ (60mm) から $\frac{60}{2\sqrt{3}} = 19.4\text{mm}$ 程度と考え、以上の式に $x = \pm 60, x_1 = -512, y_1 = 1650, x_3 = 435, y_3 = 2895$ を代入すると以下の数値を得る：

$$a = 1.31 \quad \sigma_a^2 = 4.6 \times 10^{-4} \quad (4.41)$$

$$b = 2323 \quad \sigma_b^2 = 104 \quad (4.42)$$

$$\sigma_y^2 = 2.16 \times 10^{+3} \quad \rightarrow \quad \sigma_y = 4.6 \times 10\text{mm} \quad (4.43)$$

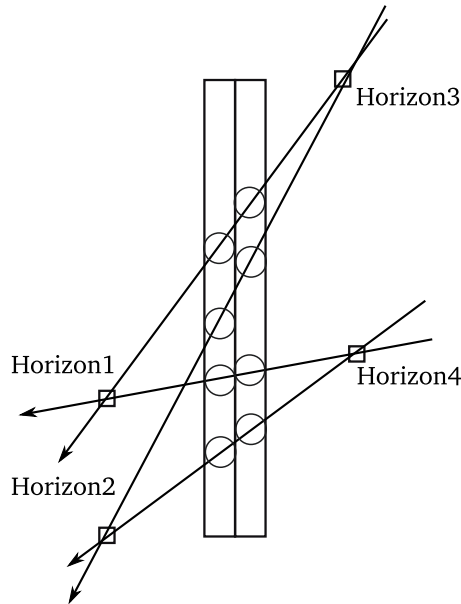


図 4.15: 横置きしたシンチレータによる位置較正 (再掲)

つまり 4cm 強の精度で外部位置を決定できる。

なおこの解析には、横置きシンチレータの大きさによる誤差は入っているが、位置の決定精度は取り入れていない。

飛跡トラッキングによる位置較正

位置較正のための測定は run161, 164, 165 の 3 回に渡って実施したが、諸々の理由により上記の方針で位置較正が可能なのは ID103-114 および ID203-214 のシンチレータに限られる。それ以外、ID101,102,115,201,202,215 のための位置較正は、先述した簡易的な較正による位置を粒子飛跡トラッキングにより補正することで行う。

飛跡トラッキングは、各シンチレータ毎に独立に得た位置情報を用いて、最も尤もらしい粒子の飛跡を求める作業である。NEBULA におけるトラッキングは層毎に行うので、求められる飛跡は実際の飛跡を各層に射影したものとなる。

実際の手順は次の通り (作業は層毎に独立行う) :

1. シンチレータのヒット数 (マルチプリシティ) を確認する。予め定めた数より少ない場合はトラッキングを行わない。
2. シンチレータ毎に位置情報 (x, y) を記録する。 x についてはシンチレータの中心線の座標で代用する。
3. 最小二乗法により、得られた位置情報に対し最尤な飛跡 (一次関数) $y = f(x)$ のパラメータを求める。

Horizon による較正済み位置によるトラッキングで得られた飛跡の式 $f(x)$ に、位置較正したい残りのシンチレータの x 位置を代入し、得られた y と時間差 dt との相関を見てフィッティングを行う。

トラッキング残差による補正

横置き検出器による位置較正が有効な場合にも、トラッキングによる補正は有効である。初期値としてトラッキングに用いる位置 (タイミングから計算した位置) を y_0^{time} とし、これらによるトラッキングで得られた位置を y_0^{track} と書く。残差による補正は次のように行う :

$$F_i(y_i^{\text{time}}) := (y_i^{\text{time}} - y_i^{\text{track}}) \quad (4.44)$$

$$y_{i+1}^{\text{time}} := y_i^{\text{time}} - F_i(y_i^{\text{time}}) \quad (4.45)$$

i は補正の繰り返し回数。 F_i は実際にはフィッティングによる近似関数である。補正実施時には F_i として 6 次関数を用いている。関数のパラメータは、「区間 $(-1000, 1000)$ 上に等間隔に 6 つのゼロ点を持ち、かつ定数係数が 1」になるように与える⁶。

実際には補正は 1 回で十分で、繰り返すと残差自体は悪化する。ただし残差の中心値はゼロに近づく。

⁶一意に定まる。

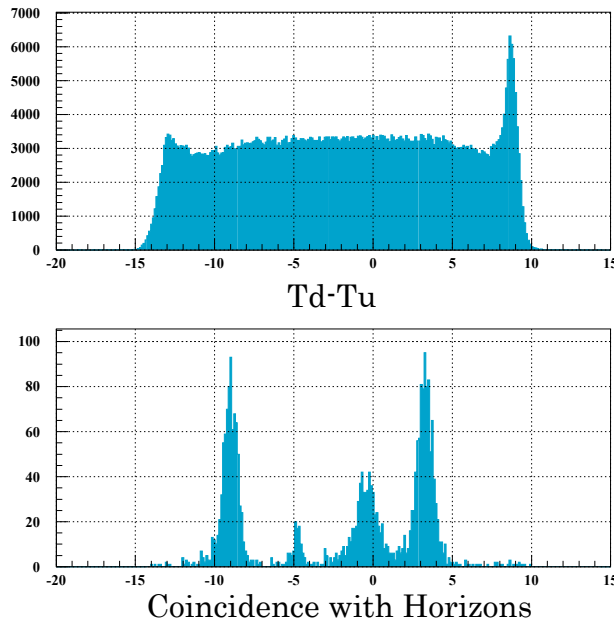


図 4.16: 上下時間差 $dt = t_d - t_u$ のスペクトル。上はゲートなし、下は横置き検出器とのコインシデンスゲート適用。下では図 4.15 に示した 4 箇所交点が見えている。

4.3.6 時間の較正

時間較正の目的は、観測される時間と真の時間 (事象 = 粒子のエネルギー損失の発生時間) との差をなるべく小さくすることにある。この差を乱す原因は複数考えられる:

- エネルギー損失過程に有限の時間がかかること
- シンチレーション光源が有限の拡がりを持つこと
- 波形による時間のずれ ('slew')
- 信号処理回路のジッタ

本節では、第 3 の項目である 'slew' を補正することを目的とする。

'slew'

NEBULA システムで用いる Discriminator (CAEN 製 V895) はリーディングエッジ型で、入力信号の電圧が予め設定されているしきい値を超えると Logic 信号を発する。入力波形が発生してからしきい値電圧に達するにはタイムラグがある。そしてこのタイムラグは波形が含む電荷に依存する。つまり、波形が発生した真の時間と、それが Discriminator により感知される時間との間にはズレがあり、その大きさは波形が持つ電荷量により系統的に変わる。この現象は一般に 'slew' または 'walk' と呼ばれる。

slew の補正とその問題点

真の時間 t と観測時間 t' の間に生じる slew の関数系は一般に次の形をしている:

$$t' = t + \frac{C}{\sqrt{Q}} + D. \quad (4.46)$$

Q は波形に含まれる電荷量で、 C, D は slew を特徴づける定数。一見するとこの式に基づいて観測時間を補正すれば真の時間は容易に得られるように思えるが、それには適正なトリガ信号 (時間原点) が必要である。

「適正」とはすなわち、真の時間からのオフセットが既知で、真の時間と同一視できることを意味する。NEBULA における観測時間つまりタイミング情報は TDC にトリガ信号が入力された時刻からの経過時間である。入力トリガ信号を内部生成 (セルフトリガ) する場合はトリガ信号にはタイミング信号のうち最も早い⁷ものを用いるが、このようにして作られたトリガ信号のオフセットは事実上ランダムになる。よって別途適正な時間原点を与えるか、時間原点そのものを必要としない slew 補正の手法が必要になる。本論文では後者のアプローチを用いる。

⁷厳密には誤りだが、時間原点の問題を論ずるにはこれで本質的には十分である。

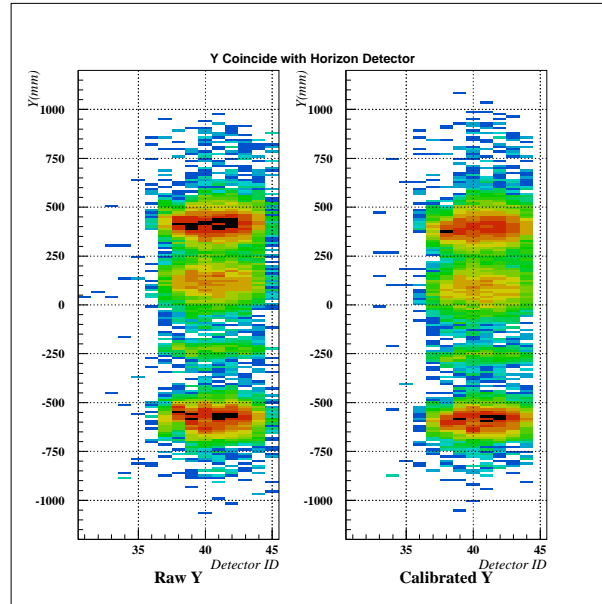


図 4.17: 水平位置 Y の横置きシンチレータとの同時測定結果。左：較正前 右：較正後

時間原点を用いない slew 補正

先の時間原点の問題により、タイミング情報の絶対値は意味を持たない。しかし、タイミング情報同士の差は、それによってオフセットが相殺されるので、意味を持つことができる。2つのタイミング信号 t_1, t_2 の差について式 4.46 を適用すると次式のようになる：

$$t'_2 - t'_1 = t_2 - t_1 + \left(\frac{C_1}{\sqrt{A_1}} + D_1 - \frac{C_2}{\sqrt{A_2}} - D_2 \right) \quad (4.47)$$

各パラメータの下つき添字は、その量が t_1, t_2 のどちらに対応するのかを表す。この式から、 A_1, A_2 のうちどちらかを固定することができれば、固定しない方による slew のみが現れるので、正確な slew 補正を行える。

CFD

CFD(Constant Fraction Discriminator) は、波高弁別のタイミングがパルスそのものの大きさに依存しないよう、検出方法が工夫された Discriminator である。

CFD の原理を簡単に説明する。パルスの波高が $f(x - vt)$ と書けるとする。このパルスを時間 τ だけ遅延させたものと、パルスを反転させて減衰させた (減衰率 C) ものを足しあわせると、合成波高は $f(x - v(t + \tau)) - C(f(x - vt))$ となる。ここで、パルスの形がパルスの電荷量に比例する (電荷量が A 倍になると波高は $Af(x - vt)$) と仮定すると、合成波高がゼロになるタイミングは波高によらず一定になる。この合成波のゼロクロスタイミングを検知するのが CFT である。

本論文では、NEBULA の通常の構成に CFD モジュールを 4ch(検出器 2 基) 分だけ導入し、slew の影響がないクリーンなタイミング情報を作る。⁸そして、これらの検出器をリファレンスとして、その他の検出器の補正を行う [4]。

時間差の位置依存性の除去

実際に slew 補正を行うためには、 $t_2 - t_1$ がゼロになるように別途補正を行う必要がある。具体的にどのような補正をするべきか、その考察のために、図 4.22 のように隣り合う 2 つのシンチレータを考え、それぞれに番号 1, 2 を充てる。考察に用いる座標系及びシンチレータと入射粒子の位置関係も図 4.22 に倣う。また図 4.22 における点 $0(x_0, y_0) = (x_0, 0)$ を通過する時刻を仮の時間原点 t_0 とする。入射粒子の移動速度を v_μ とすると、粒子が点 $1(x_1, y_1)$ および点 $2(x_2, y_2)$ を通過するのにかかる時間はそれぞれ $T_1 := v_\mu \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2}$ および $T_2 := v_\mu \sqrt{(x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2}$ と書ける。一方、点 1・点 2 から出た蛍光がシンチレータの上下に達するまでに

⁸ただし実際には CFD にも微小ながら slew 効果があるので、その補正を行って後使用する。

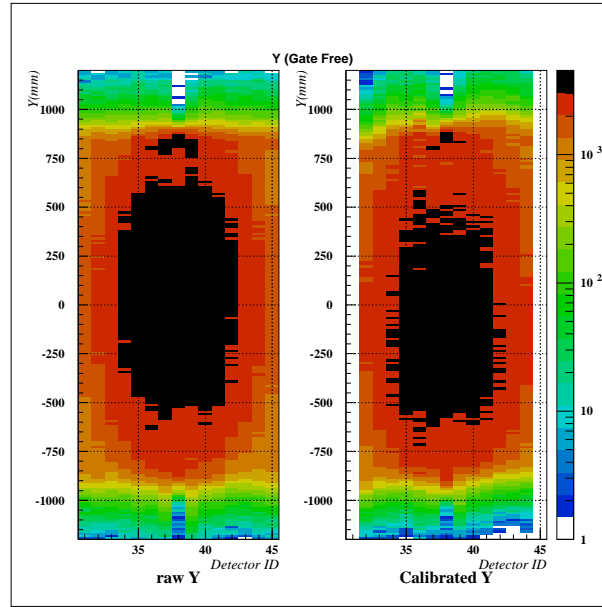


図 4.18: 位置較正前後での水平位置 y の分布。左が較正前、右が較正後。

必要な時間は、光の伝播速度を v_i ($i = 1, 2$) とし、上側が $T_u := -v_i y_1$ 、下側が $T_d := v_i(y_i + H)$ と書ける。よって、シンチレータ 1,2 それぞれの上下のタイミング $t_{u,d}$ は次のように書ける：

$$t_{1u} = -\frac{y_1}{v_1} + \frac{\sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2}}{v_\mu} \quad t_{1d} = \frac{y_1 + H}{v_1} + \frac{\sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2}}{v_\mu} \quad (4.48)$$

$$t_{2u} = -\frac{y_2}{v_2} + \frac{\sqrt{(x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2}}{v_\mu} \quad t_{2d} = \frac{y_2 + H}{v_2} + \frac{\sqrt{(x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2}}{v_\mu} \quad (4.49)$$

各タイミングの第 2 項は、幾何学的考察からそれぞれ次のように変形できる⁹：

$$\sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2} = (y_0 - y_1) \sqrt{1 + \left(\frac{x_0 - x_1}{y_0 - y_1}\right)^2} = (y_0 - y_1) \sqrt{1 + \tan^2 \theta} = \frac{y_0 - y_1}{\cos \theta} \quad (4.50)$$

$$\sqrt{(x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2} = (y_0 - y_2) \sqrt{1 + \left(\frac{x_0 - x_2}{y_0 - y_2}\right)^2} = (y_0 - y_2) \sqrt{1 + \tan^2 \theta} = \frac{y_0 - y_2}{\cos \theta} \quad (4.51)$$

4 つのタイミングから、次の量を作る：

$$dt_u := t_{1u} - t_{2u} = -\frac{y_1}{v_1} + \frac{y_2}{v_2} - \frac{y_1 - y_2}{v_\mu \cos \theta} \quad (4.52)$$

$$dt_d := t_{1d} - t_{2d} = -\frac{y_2}{v_2} + \frac{y_1}{v_1} - \frac{y_1 - y_2}{v_\mu \cos \theta} + \frac{H}{v_1} - \frac{H}{v_2} \quad (4.53)$$

$$d\langle T \rangle := \frac{t_{1u} + t_{1d}}{2} - \frac{t_{2u} + t_{2d}}{2} = \frac{dt_u + dt_d}{2} \quad (4.54)$$

$$= -\frac{y_1 - y_2}{v_\mu \cos \theta} + \frac{H}{2v_1} - \frac{H}{2v_2} \quad (4.55)$$

幾何学的に $\frac{x_1 - x_2}{y_1 - y_2} = \tan \theta$ が成り立つので、シンチレータ物性の個体差を無視 ($v_1 = v_2 = v$) すると、

$$dt_u := -\frac{x_1 - x_2}{v \tan \theta} - \frac{x_1 - x_2}{v_\mu \sin \theta} \quad (4.56)$$

$$dt_d := +\frac{x_1 - x_2}{v \tan \theta} - \frac{x_1 - x_2}{v_\mu \sin \theta} \quad (4.57)$$

$$d\langle T \rangle = -\frac{x_1 - x_2}{v_\mu \sin \theta} \quad (4.58)$$

⁹常に $y_0 \geq y_1$ となることに注意

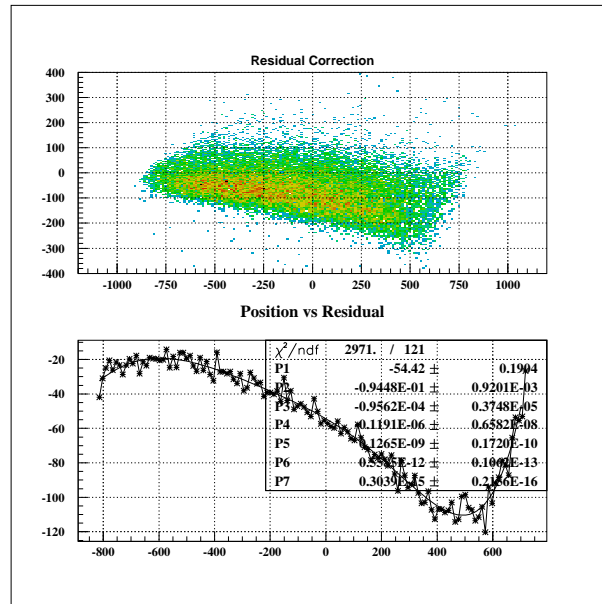


図 4.19: 未補正時のトラッキングの残差 (上) とその 6 次関数によるフィット結果 (下)

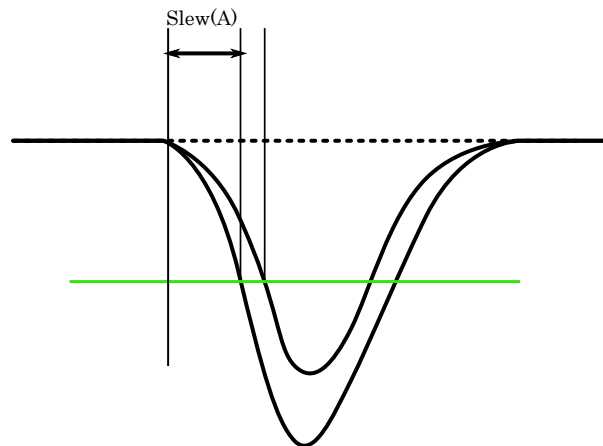


図 4.20: slew 効果の例。パルスの立上りからディスクリレベル (緑) までの時間はパルスの波高に依存する

もし全ての粒子が図 4.22 における XY 平面を動くならば、 $x_1 - x_2 = W = \text{const.}$ とすることができるので、上記 3 つの量は 1 つの変数 θ に依存する:

$$dt_u = \frac{W}{v \tan \theta} + \frac{W}{v_\mu \sin \theta} \quad (4.59)$$

$$dt_d = -\frac{W}{v \tan \theta} + \frac{W}{v_\mu \sin \theta} \quad (4.60)$$

$$d\langle T \rangle = +\frac{W}{v_\mu \sin \theta} \quad (4.61)$$

各シンチレータの y から $\theta = \arctan \frac{-W}{y_1 - y_2}$ として天頂角を求められるので、上記の式に従って依存性を除去することができる。なお、実際には粒子の飛跡は 3 次元的で、XY 平面に対し傾きを持つ。そのため W はシンチレータの幅 12cm より系統的に大きくなる。

実際に測定した各種時間差が上記の式に従う様子を図 4.23, 図 4.24 および図 4.25 に示した。

実際の補正には、2 つのシンチレータのうち一方をリファレンスとする。また、2 つは一般に隣接しない (W は位置関係に応じて変動する)。

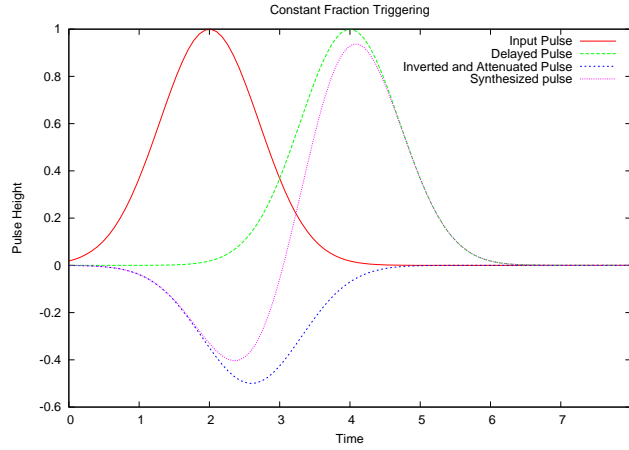


図 4.21: CFT(Constant Fraction Triggering) の図解。パルスは Gaussian で近似してある。入力波形 (Input Pulse) を遅延させたものが Delayed Pulse, 反転して減衰させたものが Inverted and Attenuated Pulse。これら 2 つを合成したのが合成波形 (Synthesized Pulse)。CFT では、合成波形がゼロを横切る時間を見る。

実際の位置依存性除去

天頂角 θ は理想的には 2 つのシンチレータでの位置の差 dY から決定できるが、これは 2 点から最小 2 乗法で直線を決定することと同じで誤差が大きい。よって実際の補正に用いる天頂角は飛跡トラッキングから得たものを用いるのがより適切である。しかし、トラッキングから角度を使うにはトラッキングが可能である必要がある。後々行う slew 補正ではアナログが小さなイベントが重要になるが、トラッキング可能という条件はこの種のイベントの数をかなり削減する。そこで、トラッキングができない場合もトラッキング天頂角と同等の量を使うために、 dY との対応付けを前もって行う。すなわち、トラッキングによる天頂角 θ_{Tr} に対し、

$$\theta_{Tr} = f(dY) \tag{4.62}$$

となる較正関数 f をフィッティングにより求め、後の較正では $f(dY)$ を θ_{Tr} の代用として用いる。

位置 y が上下時間差 $dt = t_d - t_u$ の関数であることを考えると、「時間差の差」 ddt と θ_{Tr} との対応をつけておけば位置情報が使えないシンチレータについても補正が可能になる (slew 補正自体は位置情報がいらぬ) ので、実際にはこちらを用いる。図 4.26 は ddt と θ_{Tr} との相関を示している。この相関を \arcsin と \arctan の和でフィットして、式 (4.62) の関数 f を得る。

以上の手続きから求めた角度様情報 (以後これを θ_{dt} と記す) を用いて位置依存性の除去を行うが、実際には $d\langle T \rangle$ を経由せず、上時間差 dt_u 、下時間差 dt_d をそれぞれ直接ワンステップで補正する。すなわち、これら 2 つと θ_{dt} との相関を関数

$$f(\theta_{dt}) = \frac{p_1}{\tan(\theta_{dt} - p_2)} + \frac{p_4}{\sin(\theta_{dt} - p_2)} + p_3 \tag{4.63}$$

でフィットして、これを dt_u, dt_d から差し引く。差し引き後の値は位置に依存するファクタを含まないので、slew 補正が行える。

ゲートによる'良い'イベントの選択

これまでに説明してきた位置依存性の除去を行うにあたって、気をつけるべき点がもう 1 つある。図 4.27 は、図 4.22 を上から見下ろしたものである。図中の 3 本の矢印は宇宙線の飛跡を示している。×印をつけた 2 本は、シンチレーション光源の間隔 $x_1 - x_2$ が W から大きく外れるために時間差 $d\langle T \rangle$ が式 4.58 に従わない可能性が高い。

このような悪いイベントを除くためには「通過距離の差が小さい」という条件でイベントを選別するのが良いが、通過距離自体を直接求めることは困難なので、その代わりとして「エネルギー損失の差が小さい」という条件を設ける。宇宙線 (\sim ミュオン) の速さは光速に近いので、シンチレータ中でエネルギーを失っても事実上減速しないと考えることができる。ゆえに長さあたりのエネルギー損失は一定で、従って損失の合計は通過距離に比例する。

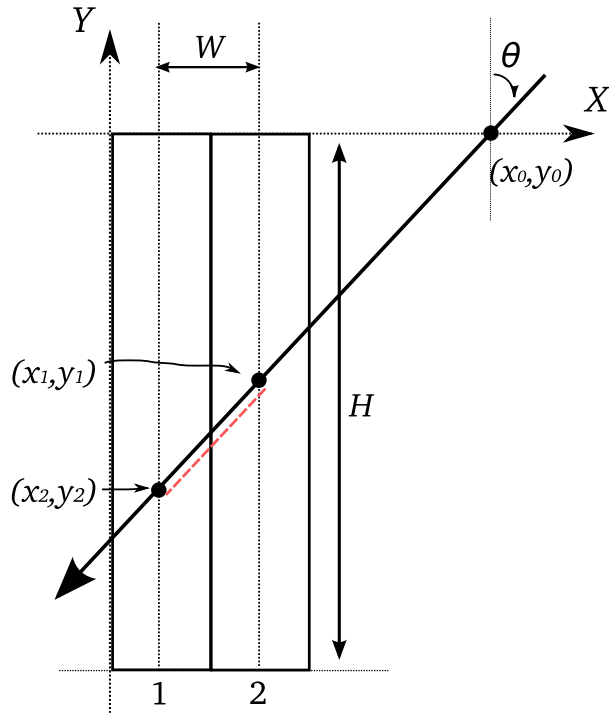


図 4.22: タイミングの差と入射粒子の軌跡の依存関係の模式図。この図に従って座標を設定して考察する。

slew の補正

位置依存性を除去した後の上下時間差 dt_u, dt_d は式 (4.47) に従うはずである：

$$dt'_u = t'_{1u} - t'_{2u} = t_{1u} - t_{2u} + \left(\frac{C_{1u}}{\sqrt{A_{1u}}} + D_{1u} - \frac{C_{2u}}{\sqrt{A_{2u}}} - D_{2u} \right) \quad (4.64)$$

$$dt'_d = t'_{1d} - t'_{2d} = t_{1d} - t_{2d} + \left(\frac{C_{1d}}{\sqrt{A_{1d}}} + D_{1d} - \frac{C_{2d}}{\sqrt{A_{2d}}} - D_{2d} \right) \quad (4.65)$$

この式に、例えば A_2 を固定¹⁰するゲートを適用して、固定しない方 (A_1) との相関を見ると、そこには A_1 による slew が現れるはずである。図 4.3.6 の左側は実際の実験データで見たこの相関で、右側は、左側に見えるカーブを次の関数形でフィットしたものである：

$$f(x) = \frac{p_1}{\sqrt{x+p_2}} + p_3 \quad (4.66)$$

図 4.3.6 でフィットを行って求めた $f(x)$ を用いて slew の補正を行うと、図 4.3.6 の左側のように時間差のアナログ依存性が除去される。

位置とアナログ依存性を除去した時間差は理想的には 1 つのピークを持つ。実際の時間差分布も、slew 補正が正しく行われていれば図 4.3.6 の右に示すように単独のピークを持つ。これは 2 つの検出器 (補正対象とリファレンス) の合成時間分解能を直接反映する。

時間差分布からの時間分解能の評価

全てのファクタを除去した時間差は、2 つの検出器の時間分解能を反映した分布を持つ：

$$\sigma_{t_1-t_2} = \sqrt{\sigma_{t_1}^2 + \sigma_{t_2}^2}. \quad (4.67)$$

通常は、一方を補正対象検出器、もう一方をリファレンス検出器とする。左辺は直接測定できるので、リファレンス検出器の分解能がわかれば、補正対象検出器の分解能を推定できる。

リファレンス検出器の分解能は、次節に述べる方法で推定する。

¹⁰狭い範囲 (10-20ch くらい) に限定する、という程度の意味

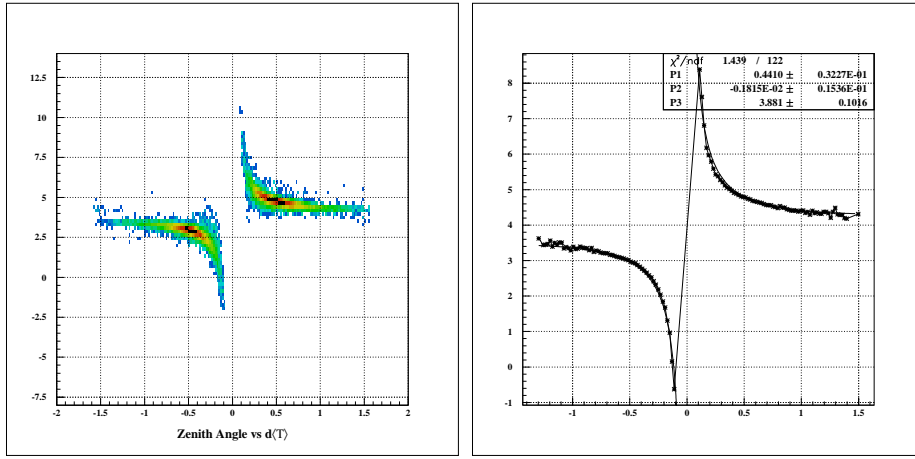


図 4.23: 天頂角 (横軸) と時間差 $d(T)$ との相関 (左) とそのフィット結果 (右)。フィット関数は $f(x) = \frac{p_1}{\sin(x-p_2)} + p_3$.

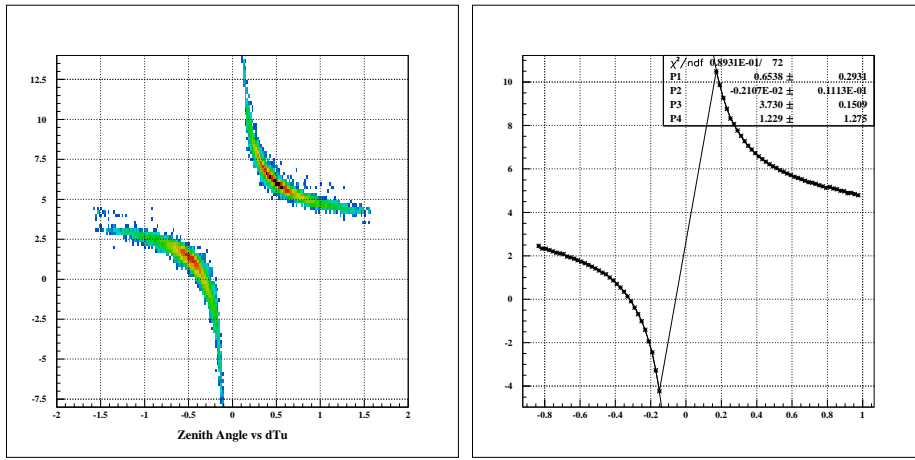


図 4.24: 天頂角 (横軸) と上時間差 dt_u との相関 (左) とそのフィット結果 (右)。フィット関数は $f(x) = \frac{p_1}{\sin(x-p_2)} + \frac{p_1 p_4}{\tan(x-p_2)} + p_3$.

リファレンス検出器の時間分解能評価

2 基のリファレンス検出器について、時間差 dt_u, dt_d の分解能から単独の分解能を推定する方法を述べる。
2 つの時間 t_1, t_2 の時間差 $t_1 - t_2$ の分布の幅を、4 通りの場合で評価する：

- σ_A : 制限なし
- σ_B : A_2 を制限
- σ_C : A_1 を制限
- σ_D : A_1, A_2 を制限

図 4.30 に測定例を示す。

t_1 と t_2 の誤差が独立であると考えれば、上記の幅は次のように書ける：

$$\sigma_A^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 \tag{4.68}$$

$$\sigma_B^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^{\prime 2} \tag{4.69}$$

$$\sigma_C^2 = \sigma_1^{\prime 2} + \sigma_2^2 \tag{4.70}$$

$$\sigma_D^2 = \sigma_1^{\prime 2} + \sigma_2^{\prime 2} \tag{4.71}$$

ただし σ' は、対応するアナログを制限した場合の幅である。この式は右辺を未知数とした連立方程式と見なせるが、係数行列が逆行列を持たないため解くことができない。そこでいくつかの仮定を措いて評価を行う。1 つめは「アナ

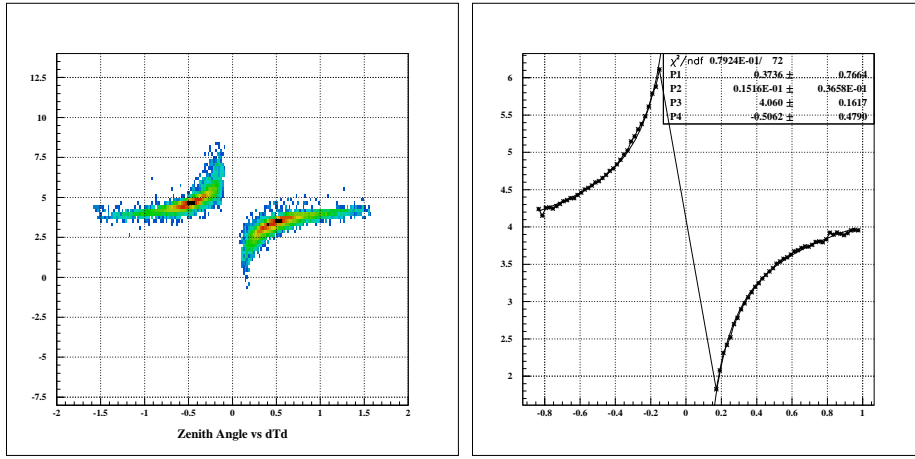


図 4.25: 天頂角 (横軸) と下時間差 dt_d との相関 (左) とそのフィット結果 (右)。フィット関数は図 4.24 と同型の $f(x) = \frac{p_1}{\sin(x-p_2)} + \frac{p_1 p_4}{\tan(x-p_2)} + p_3$.

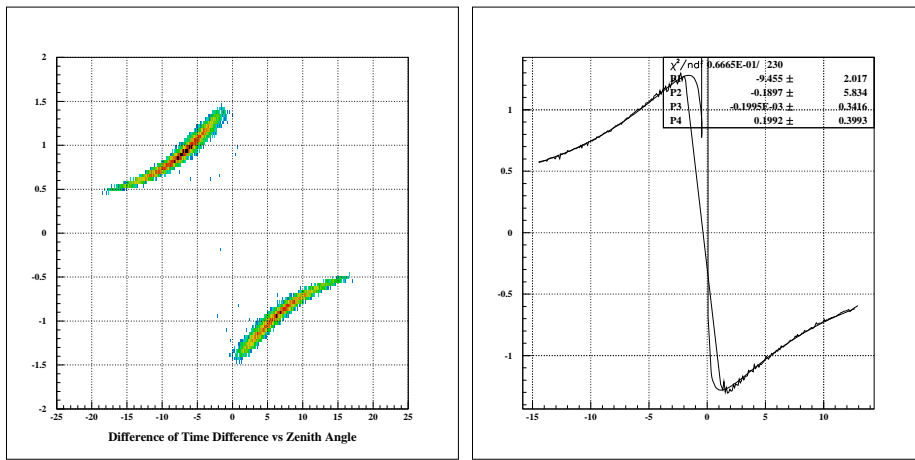


図 4.26: 「時間差の差」と天頂角の対応。左は実際の測定結果、右はそのフィッティング。いずれも横軸は θ_{dt} 、縦軸は ddt である。フィット結果のゼロ付近における異常な挙動は \arcsin, \arctan の特異点によるもの。 θ_{dt} が特異点付近になるようなイベントはトリガ条件上起こり得ないので、較正には影響しない。

ログを固定した場合の幅は固定しない場合の幅より小さい。2 つめは「アナログを固定した場合の幅は t_1 と t_2 で同等」。数式で書くと、

$$\sigma_1^2 > \sigma_1'^2 \quad (4.72)$$

$$\sigma_2^2 > \sigma_2'^2 \quad (4.73)$$

$$\frac{\sigma_D^2}{2} \sim \sigma_1'^2 \sim \sigma_2'^2 \quad (4.74)$$

σ_1 について評価すると、まず下限が $\sigma_1^2 > \sigma_1'^2 \sim \sigma_D^2/2$ で与えられる。更に、式 (4.68) より $\sigma_2^2 = \sigma_A^2 - \sigma_1^2$ となるが、 $\sigma_2^2 > \sigma_2'^2 \sim \sigma_D^2/2$ でもあるので、結局 $\sigma_A^2 - \sigma_1^2 > \sigma_D^2/2$ 。例として図 4.30 における幅の数値 ($\sigma_A^2 = 0.241, \sigma_D^2 = 0.189$) を用いると：

$$\sigma_A^2 - \sigma_D^2/2 > \sigma_1^2 > \sigma_D^2/2 \quad (4.75)$$

$$\rightarrow 0.20^2 > \sigma_1^2 > 0.13^2 \quad (4.76)$$

単位は ns. あるいは、2 つめの仮定のみから、式 (4.69) を用いて仮の値を導くこともできる。その場合、 $\sigma_1^2 = \sigma_B^2 - \sigma_2'^2 \sim \sigma_B^2 - \sigma_D^2/2 = 0.17^2$ となる。

以上の議論をリファレンス検出器に対して適用する。

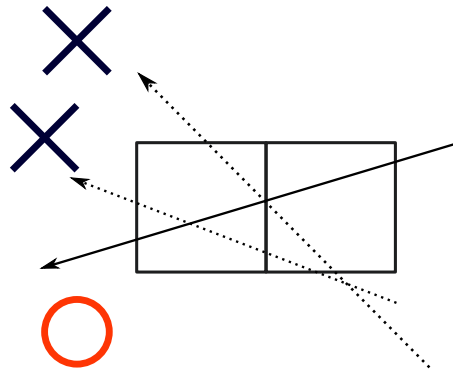


図 4.27: シンチレータを真上から見た時の'良い'イベント(丸印)と'悪い'イベント(×印)。

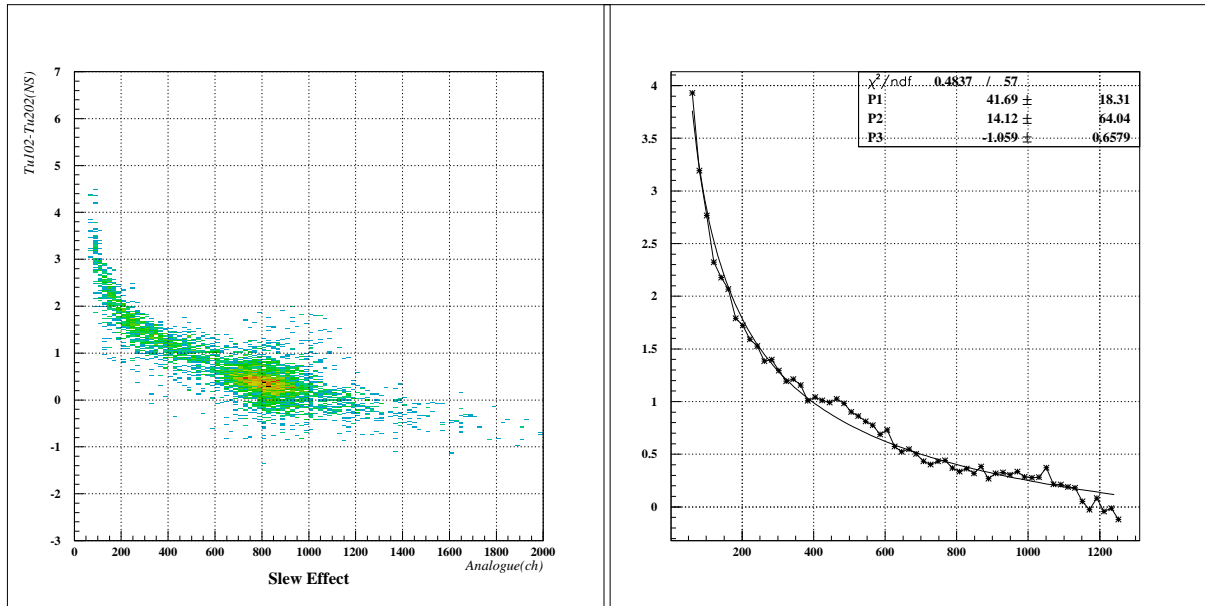


図 4.28: 上時間差 dt_u に現れた Slew(左) とそのフィット結果(右)

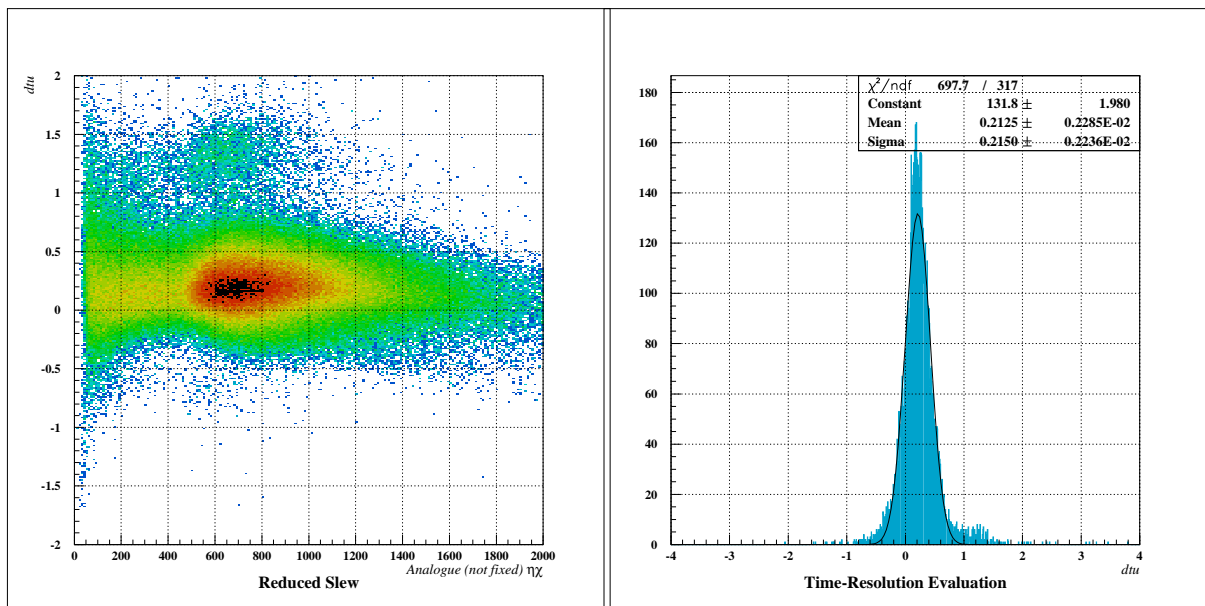


図 4.29: Slew 効果を補正した後の dt_u (左) と時間分解能評価(右)。

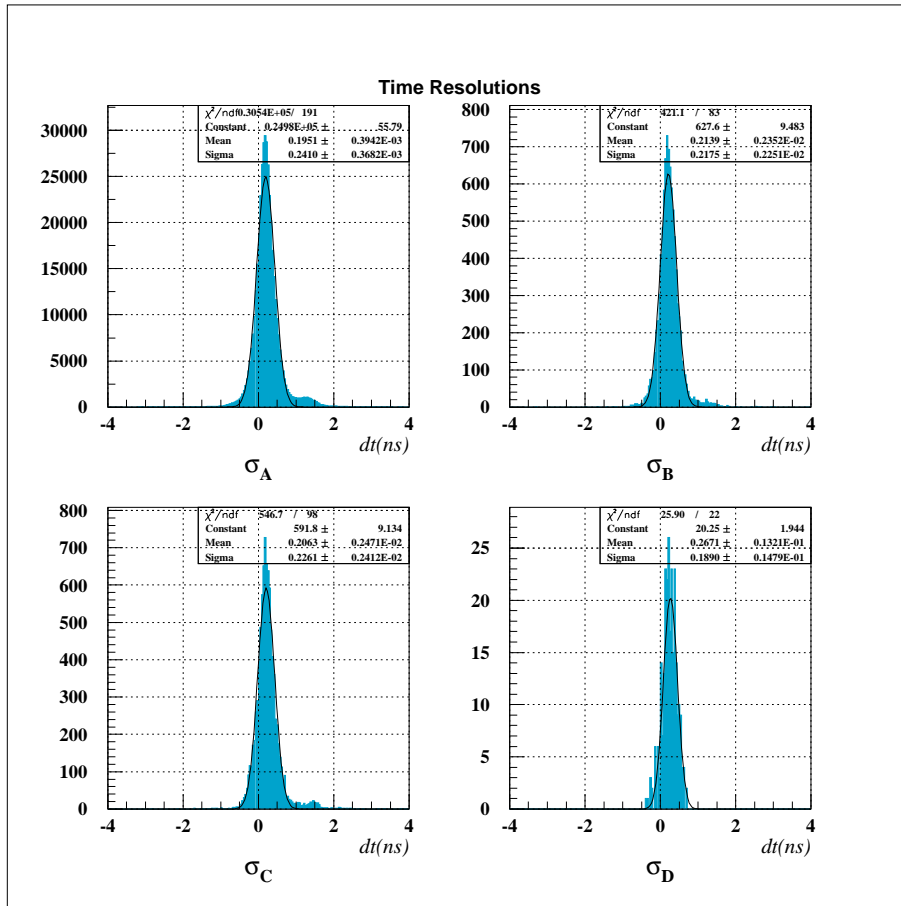


図 4.30: ゲートパターン別の時間差 $t_1 - t_2$ の分解能

第5章 データの解析結果と議論

第4章で行った較正の評価として、時間と位置の分解能の評価を行う。

5.1 時間較正と時間分解能

第4章で述べた通りの方法で行う。

まず、リファレンス検出器としてID108, 208を指定し、これらのタイミングをCFDを用いて処理、リファレンス検出器同士で相互の時間較正を行った。その結果を示す。時間分解能の推定は4.3.6節で述べた方法で行った。これらの結果を用いて、式(4.67)よりリファレンス以外の検出器の時間分解能を評価した結果を表5.2に示す。評価項目は、上下それぞれの単独での分解能、および上下平均値($\langle T \rangle$)の分解能である。

検出時間 $\langle T \rangle$ の分解能は、平均で0.14ns, 最大0.23ns, 最小0.09nsであった。

5.2 位置較正と位置分解能

位置較正も、第4章で述べた方法に従って実行した。位置は時間差 $t_d - t_u$ の関数として得られるので、位置の分解能は時間差分解能¹からの伝播と、較正関数そのものの誤差の和として得られる。分解能の推定結果を表5.3に示した。結果の平均値は22.9mm, 最大は37.0, 最小は15.3mmであった。

5.3 結果の評価

これらの分解能の善し悪しを評価するために、現在NEBULAに要求されている性能との比較を行う。

NEBULAが1MeVの相対エネルギー分解能(FWHM, 相対エネルギー8MeVの時)を実現するのに必要な時間と位置の分解能は、

$$\sigma_{\langle T \rangle} \sim 0.1ns, \quad \sigma_y \sim 30mm. \quad (5.1)$$

これに対し、時間の方は平均で要求性能を下回り、また位置の方もいくつか要求性能をクリアしない検出器がある。しかし、全体としては得られた分解能は概ねこれを達成しているといえる。

ID	σ [ns]
108U	0.154
208U	0.150
108D	0.142
208D	0.138

表 5.1: リファレンス検出器の時間分解能。値は4.3.6の推定方法(範囲ではなく推定値を求める方法)に基づく。

¹これは $\langle T \rangle$ の分解能の2倍となる

ID	σ_{dt_u}	σ_{dt_d}	σ_{t_u}	σ_{t_d}	$\sigma_{\langle T \rangle}$
101	0.348	0.296	0.312	0.260	0.203
102	0.262	0.224	0.212	0.174	0.137
103	0.225	0.207	0.164	0.151	0.111
104	0.370	0.342	0.337	0.311	0.229
105	0.242	0.216	0.187	0.163	0.124
106	0.299	0.278	0.256	0.239	0.175
107	0.348	0.306	0.312	0.271	0.207
108	—	—	0.154	0.142	0.105
109	0.270	0.217	0.222	0.165	0.138
110	0.238	0.216	0.182	0.163	0.122
111	0.213	0.199	0.147	0.140	0.101
112	0.247	0.241	0.193	0.195	0.137
113	0.193	0.199	0.117	0.140	0.091
114	0.186	0.214	0.105	0.161	0.096
115	0.189	0.238	0.110	0.191	0.110
201	0.232	0.220	0.178	0.172	0.124
202	0.250	0.230	0.201	0.184	0.136
203	0.219	0.206	0.160	0.153	0.111
204	0.305	0.278	0.266	0.242	0.180
205	0.301	0.280	0.261	0.244	0.179
206	0.352	0.316	0.319	0.285	0.214
207	0.314	0.275	0.276	0.238	0.182
208	—	—	0.150	0.138	0.102
209	0.308	0.243	0.269	0.200	0.168
210	0.336	0.262	0.301	0.223	0.187
211	0.243	0.221	0.192	0.173	0.129
212	0.243	0.206	0.192	0.153	0.123
213	0.224	0.220	0.167	0.172	0.120
214	0.225	0.193	0.168	0.135	0.108
215	0.191	0.205	0.119	0.152	0.097

表 5.2: 各検出器の時間分解能。単位は全て ns. 各カラムは、左から ID, リファレンスとの時間差の分解能 (上下)、単独での分解能 (上下) および上下平均の分解能。

ID	σ_y
102	23.5
103	17.6
104	37.0
105	20.0
106	28.2
107	33.6
108	17.5
109	21.8
110	20.2
111	16.9
112	22.3
113	15.3
114	15.9
202	21.0
203	17.4
204	28.5
205	28.0
206	33.3
207	28.8
208	16.7
209	27.2
210	29.4
211	20.1
212	19.4
213	19.1
214	16.9

表 5.3: 各検出器の位置分解能。単位はすべて mm.

第6章 まとめ

中性子検出器 NEBULA2 層分の部品を組み上げ、そのうち1層 (の半分) についてデータシステムを構築した。またオフラインでのデータの取得を行い、そのデータからエネルギー損失、時間、位置の較正する手法を確立した。また実際に較正を行い、その評価をして分解能の評価を行った。そしてこれらの数値が目標を概ね達成していることを確認した。

今後の展望としては、オフラインでの較正精度を更に上げるための解析を行うと共に、ビームを用いたオンラインでの較正実験を行うことが挙げられる。これについては、来年度の夏に、300MeV の陽子ビームを用いた較正実験が、放射線医学総合研究所の HIMAC において既に採択されている。また理化学研究所でも、 π^0 の崩壊による γ 線を用いた較正実験の予定がある。

付録A 測定種別とRUNナンバー対応

本付録には、第3章で述べた各種測定と、NBBQが実験データに付与するRUNナンバーとの対応関係を示す。RUNナンバーは時系列順になっている。

モジュール較正
149
$^{241}\text{Am-Be}$ 線源測定
131, 132, 133
宇宙線測定 (単独)
100, 101, 103, 104, 105, 113, 114, 115, 116, 138, 139, 140, 144, 145
宇宙線測定 (位置較正)
160, 161, 164, 165

表 A.1: 測定 Run ナンバーと実験内容の対応

参考文献

- [1] 田中佳奈, 学士論文”RIBF における不安定核反応測定のための高効率中性子検出器の開発”, 2008
- [2] 田中佳奈, Group Meeting Material, 2009
- [3] 佐古貴之, Group Meeting Material, 2010
- [4] Gibelin Julien, ”Search for low lying dipole strength in the neutron rich nucleus ^{26}Ne ”, 2005

謝辞

まず、NEBULA 班として共同作業を行った近藤洋介氏と佐古貴之氏に深い感謝の念を捧げると共に、度々御迷惑をお掛けしたことをお詫びします。そして、決して扱い易い学生ではなかった私を忍耐強く指導して下さった指導教官の中村隆司教授に厚く御礼申し上げます。また、2009 年度より大韓民国・ソウル国立大学に転出された、前助教の佐藤義輝氏にも、本学在籍中は手厚い指導をいただきましたことを感謝いたします。3 年に渡り籍を置いた歴代の中村研究室学生の皆様、特に同期の出口茂樹、田中直樹の両氏と先輩である小林信之氏には公私にわたって大いに助けられました。また基礎物理学専攻の旭耕一郎教授ならびに旭研究室の皆様には、常に良き隣人としてお付き合いいただいたことを感謝いたします。