

2022年度 学士論文

中性子検出器 NEBULA Plus の開発

東京工業大学 理学院 物理学系

学籍番号 19B00958

氏名 高橋里緒

指導教官 中村隆司

2023年2月13日

概要

中性子ドリップライン近傍の原子核には、中性子ハローという安定核とは異なる低密度の中性子分布の広がりをもつ核が存在し、特徴的な励起モードやダイニュートロン構造の解明が求められる。また近年では4つの中性子が共鳴状態をとるテトラニュートロンが観測され、陽子を含まない複数の中性子のみで構成される新規の原子核について注目を集めている。このような中性子過剰核の研究においては、不安定核反応で発生する複数の中性子を大立体角、高い検出効率を持つ中性子検出器で同時観測することが要求される。

NEBULA (NEutron-detection system for Breakup of Unstable-nuclei with Large Acceptance) は、理化学研究所の重イオン加速器施設 RIBF の基幹装置である多種粒子測定装置 SAMURAI の大立体角中性子検出器群である。NEBULA 全体の有感体積は $360 \text{ cm(H)} \times 180 \text{ cm(V)} \times 48 \text{ cm(D)}$ であり、 $12 \text{ cm(H)} \times 180 \text{ cm(V)} \times 12 \text{ cm(D)}$ の中性子検出用プラスチックシンチレータ計 120 モジュールと荷電粒子除去用のプラスチックシンチレータ計 24 モジュールから構成される。

現在 NEBULA のアップグレードを進めており、既存の検出器に加え新たに同様の検出器モジュール 90 本を追加した NEBULA Plus を設置した。合計 210 本の中性子検出器を 4 層構造にしたシミュレーションによると、4 中性子の検出効率は従来の 2 層構造をとる NEBULA と比べて約 6 倍に向上する見込みである。本論文では、宇宙線を用いた NEBULA の位置較正の手法と解析結果について説明する。また NEBULA Plus の開発において NEBULA とのデータの統合を行う必要があり、NEBULA Plus についても同様に位置較正に関する測定結果について述べる。

目次

第 1 章	序	6
第 2 章	実験概要	10
2.1	実験手法	10
2.1.1	不変質量法	10
2.1.2	欠損質量法	11
2.2	実験セットアップ	11
第 3 章	中性子検出器 NEBULA と NEBULA Plus の概要	13
3.1	NEBULA と NEBULA Plus の構成	13
3.2	検出器と中性子の検出方法	13
3.2.1	NEUT, VETO	13
3.2.2	HPC	15
3.2.3	中性子の検出方法	17
3.2.4	中性子とプラスチックシンチレータの反応	17
3.3	信号処理回路	18
3.3.1	NEBULA	18
3.3.2	NEBULA Plus	19
第 4 章	解析結果	21
4.1	NEBULA 単体での測定	21
4.1.1	TDC の時間較正	21
4.1.2	QDC のペDESTAL 除去	22
4.1.3	位置較正	24
4.2	NEBULA と NEBULA Plus のデータマージ	27
4.2.1	NEBULA Plus 単体の宇宙線測定	27
4.2.2	NEBULA Plus+HPC の宇宙線測定	27
第 5 章	まとめと今後の展望	30

目次

1.1	陽子数 $Z=1 \sim 9$ の核図表 [1]。白色：安定核、赤色：陽子過剰核：青色：中性子過剰核、灰色：中性子過剰な非束縛核を示す。陽子過剰核、中性子過剰核は共に束縛核である。赤線は中性子ドリップラインを示し、束縛核と非束縛核の境界線となる。	6
1.2	中性子ハローの模式図。図は二中性子ハロー ^{11}Li を表しており、コアとなる ^9Li のまわりでダイニュートロン相関をもつ。	7
1.3	^{26}O の崩壊エネルギースペクトル [3]。	7
1.4	テトラニュートロンのエネルギースペクトル [6]。共鳴エネルギー $E_r = 0.83 \pm 0.65(stat) \pm 1.25(syst)$ MeV においてテトラニュートロンが 4 イベント観測された。このときの崩壊幅は $\Gamma < 2.6$ MeV である。	8
1.5	テトラニュートロンのエネルギースペクトル [8]。赤線のピークがテトラニュートロンの共鳴エネルギー $E_r = 2.37 \pm 0.38(stat) \pm 0.44(sys)$ MeV、共鳴幅 $\Gamma = 1.75 \pm 0.22(stat) \pm 0.30(sys)$ MeV を表す。	9
2.1	SAMURAI の概観。 ^{26}O 実験におけるセットアップ。	12
3.1	NEBULA の概観 (正面)。正面に VETO 検出器、後ろに中性子検出器が並ぶ。	14
3.2	NEBULA の概観 (側面)。右側 2 架台が従来の NEBULA、左側 2 架台が増設された NEBULA Plus である。	14
3.3	NEBULA の上面図。各架台についてビーム入射方向から順に wall1、wall2、wall3、wall4 とする。wall3、wall4 が従来の NEBULA、wall1、wall2 が増設した NEBULA Plus である。検出器ごとの ID は図のように左から順に番号をつける。NEBULA は NEUT:ID=1~120、VETO:ID=121~144 とする。NEBULA Plus も同様にして NEUT のみ ID=1~90 とした。	15
3.4	NETO、VETO の寸法	16
3.5	NEBULA、NEBULA Plus における HPC の配置。	16
3.6	中性子と ^{12}C または H との反応断面積 [10]。破線：H との反応、実線： ^{12}C との反応を示す。	18
3.7	NEBULA の信号処理回路	18

4.1	TDC キャリブレーションデータの較正前の TDC スペクトル。	22
4.2	較正後の TDC スペクトル。ピークの本数が 50 本、間隔が 20ns となっている。 横軸は実時間 (単位: ns) に変換された。	22
4.3	ペDESTAL補正前の QDC スペクトル。各検出器の鉛直上側の PMT の信号を入力している。ID=1~120 : 中性子検出器、ID=121~144 : VETO 検出器である。	23
4.4	ペDESTAL補正後の QDC スペクトル。	23
4.5	ID=60 の NEUT で測定した宇宙線の dT 分布。	24
4.6	HPC(8,10) を通過する宇宙線の dT 分布。宇宙線の飛跡は中性子検出器上部を通過すると考えられる。赤線はピークの頂点から ± 3 ns の範囲をガウシアンフィッティングした線である。	25
4.7	HPC(9,13) を通過する宇宙線の dT 分布。宇宙線の飛跡は中性子検出器下部を通過すると考えられる。赤線は図 4.6 のときと同様にガウシアンフィッティングした線である。	26
4.8	位置 y と時間差 dT 。赤線は一次関数フィッティングを行った。この直線の傾きが $v_s/2$ 、 y 切片が y_0 に対応する。	27
4.9	NEBULA Plus における宇宙線の dT 分布。	28
4.10	電荷 Q の dT 分布。 Q は QDC で取得した電荷量であり、検出器内でのエネルギー損失に相当する。	28
4.11	NEBULA Plus における HPC(1,6) を通過するときの宇宙線の dT 分布。	29

表目次

3.1	NEUT, VETO の寸法と本数	14
3.2	HPC 配置	17
4.1	各 HPC ゲートごとの dT 分布におけるガウシアンフィッティングの結果 (ID=60)	26

第 1 章

序

中性子過剰核では、安定核には見られなかった現象や特異な構造が現われることが特徴となっている。図 1.1 核図表中の中性子ドリップラインは、強い相互作用で崩壊を起こす非束縛核と束縛核の境界線として定義される。この中性子ドリップライン近傍の核において、中性子ハローと呼ばれる通常の原子核とは異なる核密度を持つ原子核が実験的に複数確認されている。中性子ハローとはコアのまわりに価中性子が低密度で空間的広がりをもつ構造であり、二つの条件を満たすときに発達する。一つ目は 1 中性子分離エネルギー S_n もしくは 2 中性子分離エネルギー S_{2n} が小さいことである。通常安定核における 1 中性子分離エネルギーは 8 MeV 程度であるが、2 中性子ハローとして知られている ^{11}Li の 2 中性子分離エネルギーは $369.28 \pm 0.64\text{keV}$ と 1 桁以上小さい値となる [1]。二つ目は軌道角運動量が小さい ($l = 0, 1$) ことである。これらの条件を満たす場合にトンネル効果によって中性子が平均ポテンシャルの外に滲み出すことで中性子ハロー構造が発達し、大きな平均二乗半径を持つようになる。

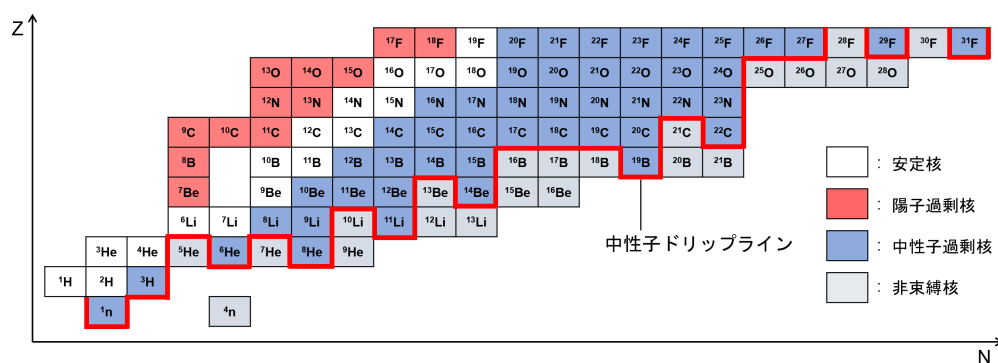


図 1.1 陽子数 $Z=1 \sim 9$ の核図表 [1]。白色：安定核、赤色：陽子過剰核、青色：中性子過剰核、灰色：中性子過剰な非束縛核を示す。陽子過剰核、中性子過剰核は共に束縛核である。赤線は中性子ドリップラインを示し、束縛核と非束縛核の境界線となる。

2 つの中性子がハロー構造をとっている 2 中性子ハローや中性子過剰な非束縛核では、2 つの中性子が空間的に局在するようなダイニュートロン相関を持つことが示唆されている。2 中性子ハ

ローの代表的な例である ^{11}Li の模式図を図 1.2 に示す。 ^{11}Li ではクーロン分解反応断面積の測定からダイニュートロン相関が発達することが示唆されている [2]。

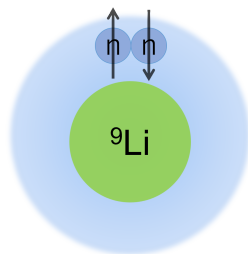


図 1.2 中性子ハローの模式図。図は二中性子ハロー ^{11}Li を表しており、コアとなる ^9Li のまわりでダイニュートロン相関をもつ。

一方、中性子ドリップラインを超える中性子殻模型にも特異構造が現れることが最近の研究で明らかになってきた。 ^{26}O を例に挙げると



と束縛核 ^{24}O と 2 中性子に崩壊する。この崩壊エネルギーは $18 \pm 3(\text{stat}) \pm 4(\text{syst})$ keV [3] であることが近藤らの実験により求められたが、この値はこれまで測定された中で最小の 2 中性子崩壊エネルギーとなっている。3 体モデルの理論計算によれば、こうした非束縛中性子殻模型の共鳴状態においてもダイニュートロン相関が発達していると予想されており [4]、実験による検証が期待されている。

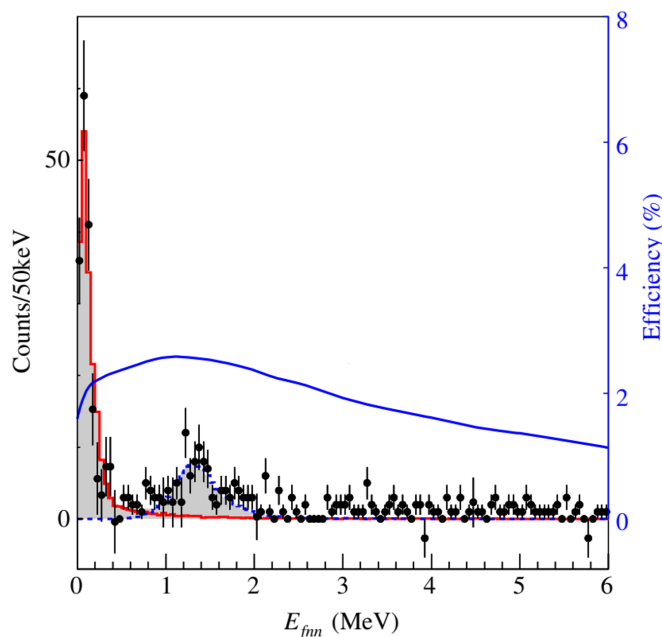


図 1.3 ^{26}O の崩壊エネルギースペクトル [3]。

最近、4中性子のみで構成されるテトラニュートロン(4中性子系)に関する研究が進展し、注目を集めている。テトラニュートロンは1960年代から束縛もしくは共鳴状態どちらをとるか議論され続けてきた。テトラニュートロンの初の観測事例は、2002年のマルケスらによる ^{14}Be の実験である[5]。ただし、この事象についてはエネルギー測定がなく、また追実験での確認がなされておらず確定的でない。その後2016年、理研RIBFのSHARAAQスペクトロメータを用いた木佐森らによる二重荷電交換反応 $^4\text{He}(^8\text{He}, ^8\text{Be})4\text{n}$ の実験により共鳴エネルギー $E_r = 0.83 \pm 0.65(\text{stat}) \pm 1.25(\text{syst})\text{MeV}$ のテトラニュートロンの候補が発見された[6]。ただしこの実験ではテトラニュートロンの候補は4イベントのみであった。一方Faestermannらの実験では、 $^7\text{Li}(^7\text{Li}, ^{10}\text{C})4\text{n}$ 反応において全励起エネルギーが $E^*(^{10}\text{C}+4\text{n}) = 2.93 \pm 0.16\text{MeV}$ と測定され、テトラニュートロンが束縛エネルギー $B(4\text{n}) = 0.42 \pm 0.16\text{MeV}$ の束縛状態をとると解釈された[7]。

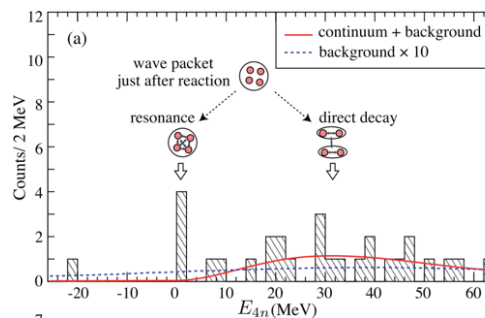


図 1.4 テトラニュートロンのエネルギースペクトル [6]。共鳴エネルギー $E_r = 0.83 \pm 0.65(\text{stat}) \pm 1.25(\text{syst})\text{MeV}$ においてテトラニュートロンが4イベント観測された。このときの崩壊幅は $\Gamma < 2.6\text{MeV}$ である。

2022年Duerらは、理研RIBFのSAMURAIスペクトロメータを用いて $^8\text{He}(p, p^4\text{He})4\text{n}$ 反応でテトラニュートロンを生成し、図1.5に示すような高い統計精度のデータを得ることに成功した。この実験で測定した共鳴エネルギーは $E_r = 2.37 \pm 0.38(\text{stat}) \pm 0.44(\text{sys})\text{MeV}$ 、共鳴幅は $\Gamma = 1.75 \pm 0.22(\text{stat}) \pm 0.30(\text{sys})\text{MeV}$ であった[8]。

これまでの4中性子系の実験は、欠損質量法を用いて行われてきた。この手法は4中性子を直接検出することなくその質量を決定できる一方で、中性子同士の相関などを調べることはできない。そのため4中性子の同時検出が可能となれば、より精度の高い4中性子系の測定が実現される。現在理化学研究所RIBFでは、中性子検出器NEBULAのアップグレードが進行している。従来中性子検出器を2層×2架台分並べていたところ計4架台に並べた。これによりシミュレーションでは4中性子の検出効率が大幅に向上し、4中性子の同時検出が可能となる。

本論文では、中性子検出器NEBULA Plusの開発において特にNEBULAとNEBULA Plusの位置較正について述べる。第2章では不安定核実験の手法とNEBULAを用いて行われた実験

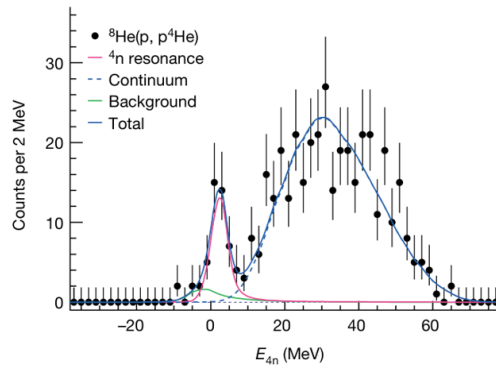


図 1.5 テトラニュートロンのエネルギースペクトル [8]。赤線のピークがテトラニュートロンの共鳴エネルギー $E_r = 2.37 \pm 0.38(stat) \pm 0.44(sys)$ MeV、共鳴幅 $\Gamma = 1.75 \pm 0.22(stat) \pm 0.30(sys)$ MeV を表す。

セットアップの例について、第 3 章では NEBULA と NEBULA Plus 検出器の概要および中性子の検出方法について述べる。第 4 章では宇宙線を利用した NEBULA と NEBULA Plus の位置較正について述べる。最後第 5 章でまとめと今後の展望について述べる。

第 2 章

実験概要

2.1 実験手法

中性子ドリップライン近傍の核や中性子のみで構成される原子核の安定性は、研究対象の原子核の質量と相対エネルギーを求めることで研究可能である。ここで有効的な核分光法として不変質量法、欠損質量法の二つが挙げられる。以下、それぞれの方法の特徴について説明する。

2.1.1 不変質量法

ここでは $^{26}\text{O} \rightarrow ^{24}\text{O} + n + n$ を例として説明する。崩壊物 ^{24}O と 2 つの中性子を直接同時に検出し、運動量ベクトルを測定することで中性子系の相対エネルギーが導出された。自然単位系 $c = 1$ において、崩壊物 ^{24}O と 2 中性子のエネルギーをそれぞれ $E_{^{24}\text{O}}$, E_{n_1} , E_{n_2} 、運動量ベクトルを $\mathbf{P}_{^{24}\text{O}}$, \mathbf{P}_{n_1} , \mathbf{P}_{n_2} 、静止質量を $m_{^{24}\text{O}}$, m_{n_1} , m_{n_2} とすると、エネルギー保存則、運動エネルギー保存則から ^{26}O の不変質量 M は

$$M = \sqrt{(E_{^{24}\text{O}} + E_{n_1} + E_{n_2})^2 - (\mathbf{P}_{^{24}\text{O}} + \mathbf{P}_{n_1} + \mathbf{P}_{n_2})^2} \quad (2.1)$$

と表せる。また崩壊エネルギーに相当する相対エネルギー E_{rel} は

$$E_{rel} = M - (m_{^{24}\text{O}} + m_{n_1} + m_{n_2}) \quad (2.2)$$

と導出することができる。よって、崩壊粒子の運動量ベクトルを測定することによって原子核の不変質量を導出することができる。この手法は反応後の粒子全てを検出する必要があり、エネルギー分解能が高い ($\sigma \sim 200\text{keV}$) 特徴がある。さらに相対エネルギーは入射ビームのエネルギーとは無関係なので、2 次ビームのようなエネルギーや位置・角度が広がっていても適用しやすい。また厚い標的を使ってもエネルギー分解能が大きく損なわれることはない。ただし複数中性子が放出される場合にはその同時検出が必要となり、実験的に困難である。

2.1.2 欠損質量法

${}^8\text{He}(p, p^4\text{He})4n$ 反応によりテトラニュートロンを生成した実験では、4 中性子を高い検出効率で同時検出することが困難なため、欠損質量法を用いた。

この手法は反応後の粒子全てを観測する必要がなく、中性子の運動量を計測せずとも中性子系の質量の導出が可能という利点がある。一方、不変質量法の場合と比べてエネルギー分解能が 1 MeV 程度と悪くなってしまう。したがってより精度の高いデータを得るためには、実験的な困難さはあるが不変質量法を用いた実験を行うのが望ましい。

2.2 実験セットアップ

本論文で対象となる中性子検出器 NEBULA は理化学研究所の重イオン加速器研究施設 RIBF の多種粒子測定装置 SAMURAI の一部である。ここでは ${}^{26}\text{O}$ 観測実験が行われたときの実験セットアップを例に説明する。

SAMURAI(Superconducting Analyzer for MUlti-particle from RAdio Isotope Beams) は不安定核ビームを用いた原子核反応によって生じた粒子を分離し同時検出する装置である。高強度の不安定核ビームは、SRC などのサイクロトロンで多段階に及んで加速された後、BigRIPS と呼ばれる RI ビーム生成分離装置によって目的のビームを得る。分解反応によって生じた荷電粒子は超伝導双極子磁石の磁場によって軌道を曲げられ、重イオン検出器によって検出される。これらの検出器によって軌道の飛跡、エネルギー損失、飛行時間を測定し、粒子識別を行うとともに運動量ベクトルを測定する。中性子は電荷を持たず磁場の影響を受けないため、ビーム軸上に置かれた中性子検出器 NEBULA で測定される。 ${}^{26}\text{O}$ 実験では、220MeV の ${}^{27}\text{F}$ ビームを炭素標的に衝突させることで不安定核 ${}^{26}\text{O}$ を生成した。その後崩壊物 ${}^{24}\text{O}$ は超伝導双極子磁石によって曲げられた後測定され、2つの中性子は NEBULA で検出された。(図 2.1)

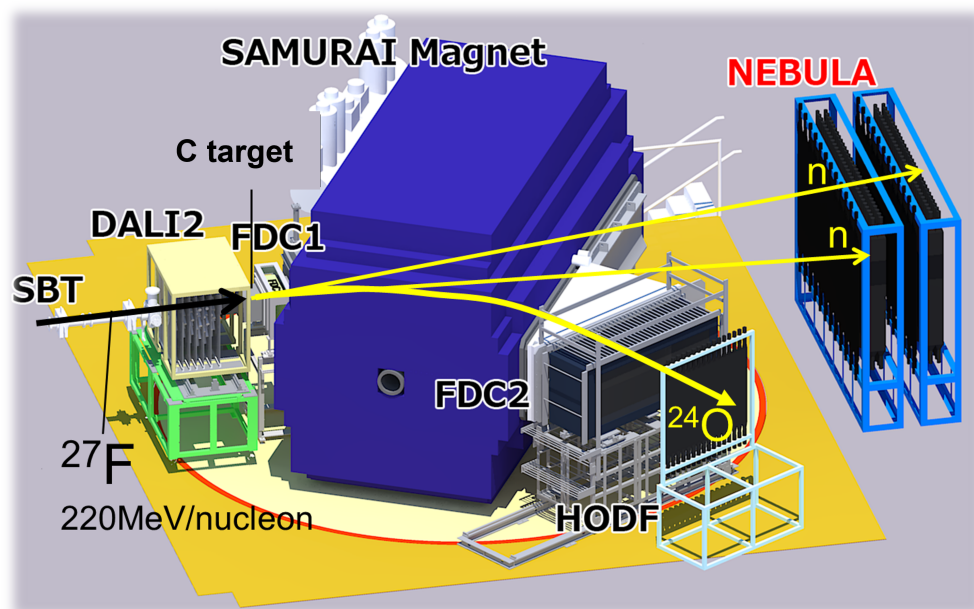


図 2.1 SAMURAI の概観。 ^{26}O 実験におけるセットアップ。

第3章

中性子検出器 NEBULA と NEBULA Plus の概要

3.1 NEBULA と NEBULA Plus の構成

NEBULA (NEutron detection system for Breakup of Unstable nuclei with Large Acceptance) は、約 100 ~ 300 MeV の高速中性子を検出するために開発された大型中性子検出器である。標的から 11.6 m 離れた位置において、水平方向 $\pm 8.8^\circ$ 、垂直方向 $\pm 4.4^\circ$ の大きい角度アクセプタンスを持つ。シミュレーションによると、中性子 1 個で 40%、2 個で約 12% の検出効率を有する。[?]

NEBULA は 12 cm \times 12 cm \times 180 cm のプラスチックシンチレータ 120 本からなる中性子検出器 (NEUT) と 32 cm \times 1 cm \times 190 cm のプラスチックシンチレータ 24 本からなる荷電粒子排除用の検出器 (VETO) から構成される。1 架台につき NEUT が 30 本 \times 2 列、VETO が 10 本並び、これが 2 架台分設置されている。有感領域は 360 cm(H) \times 180 cm(V) \times 48 cm(D) である。NEBULA Plus は、既存の NEBULA の前面に新たに中性子検出器 90 本、VETO 検出器 20 本を追加し、合計中性子検出器 210 本が 4 層構造をとるように並べられた。さらに位置較正用の外部検出器として外径 5 cm、水平方向長さ 4 m の比例計数管 HPC (Horizontal Proportional Counter) を 16 本配置した。NEBULA 正面、側面の写真をそれぞれ図 3.1、図 3.2 に示す。また NEBULA、NEBULA Plus における架台と各検出器の識別番号について図 3.3 に示す。座標系はビームラインを z 軸とし、 z 軸に垂直な平面を xy 平面としたとき水平方向を x 軸、鉛直方向を y 軸とする。

3.2 検出器と中性子の検出方法

3.2.1 NEUT, VETO

中性子検出器、VETO 検出器は共にプラスチックシンチレータ、ライトガイド、光電子増倍管 (PMT) の 3 つの要素から成る。プラスチックシンチレータ側面は遮光シートで覆われており、



図 3.1 NEBULA の概観 (正面)。正面に VETO 検出器、後ろに中性子検出器が並ぶ。



図 3.2 NEBULA の概観 (側面)。右側 2 架台が従来の NEBULA、左側 2 架台が増設された NEBULA Plus である。

上下端にはライトガイドを介して PMT が接着されている。プラスチックシンチレータは BC-408(Saint-Gobain 社製)、PMT は R7724ASSY(浜松ホトニクス社製) を使用している。NEUT、VETO 検出器の構成と寸法を図 3.4 に示す。またそれぞれ検出器の本数と寸法を表 3.1 に示す。

表 3.1 NEUT, VETO の寸法と本数

検出器	寸法 (シンチレータ)	本数	NEBULA	NEBULA Plus
NEUT	12 cm (H)×12 cm(D)×180 cm(V)	210 本	120 本	90 本
VETO	32 cm(H)×1 cm(D)×190 cm(V)	44 本	24 本	20 本

NEUT

NEUT では中性子の検出を行う。プラスチックシンチレータの寸法は 12cm×12cm×180cm である。

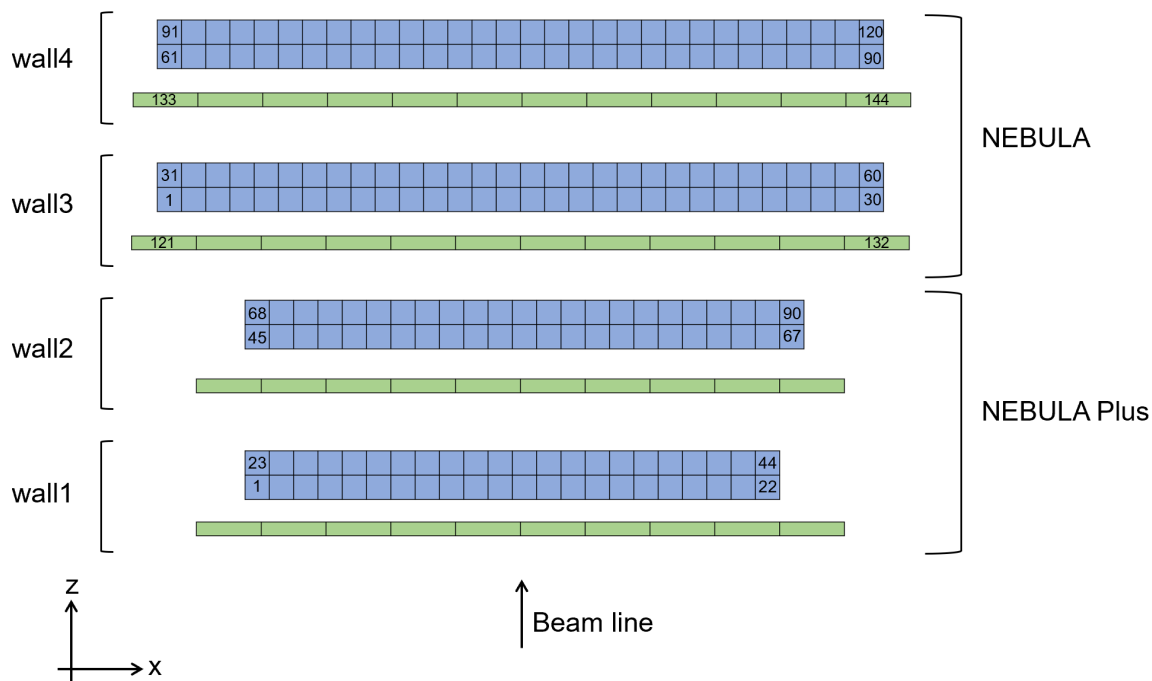


図 3.3 NEBULA の上面図。各架台についてビーム入射方向から順に wall1、wall2、wall3、wall4 とする。wall3、wall4 が従来の NEBULA、wall1、wall2 が増設した NEBULA Plus である。検出器ごとの ID は図のように左から順に番号をつける。NEBULA は NEUT : ID=1~120、VETO : ID=121~144 とする。NEBULA Plus も同様にして NEUT のみ ID=1~90 とした。

VETO

VETO では主に荷電粒子を検出する。荷電粒子によるイベントを排除するために、中性子検出器前面に配置されている。プラスチックシンチレータの寸法は 32cm×1cm×180cm と薄型である。中性子の検出効率が低く、かつ荷電粒子を検出するには十分な厚さを持っている。

3.2.2 HPC

HPC(Horizontal proportional Counter) は長さ 4m、外径 5cm の比例計数管であり、中性子検出器 NEUT の位置較正に用いる。印加電圧は 1.9 KV に設定した。

比例計数管は円筒に芯線が通っており、不活性ガスを充満させた状態で印加電圧をかけて使用する。荷電粒子が入射するとガスを電離し、電場によって加速された電子によって新たにガスを電離する。これが繰り返されることで電子なだれが発生し、増幅した信号を検出することができる。HPC16 本の配置と識別番号について図 3.5 に示す。またシンチレータ中央を通るビームラインを基準とした HPC の位置 y [cm] を次の表 3.2 に示す。

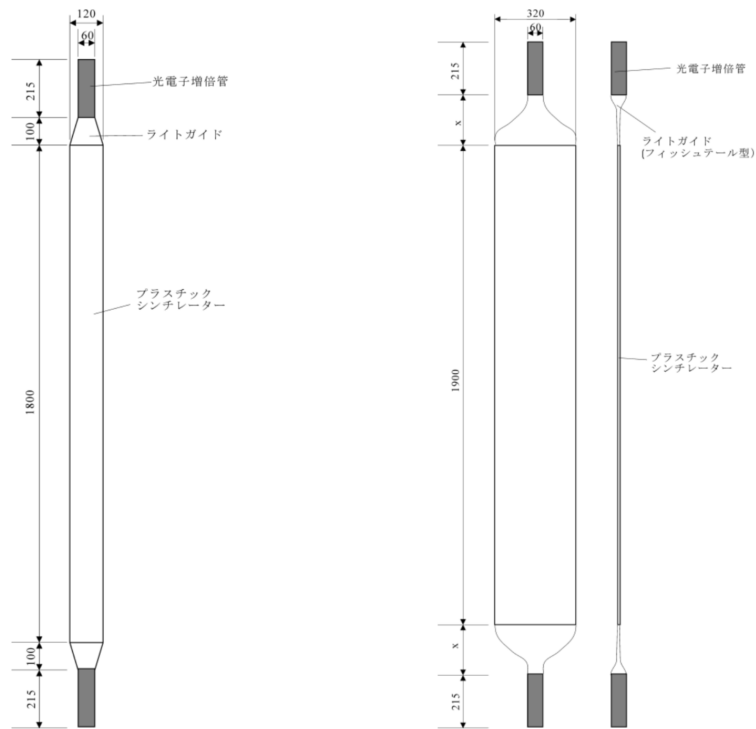


図 3.4 NETO、VETO の寸法

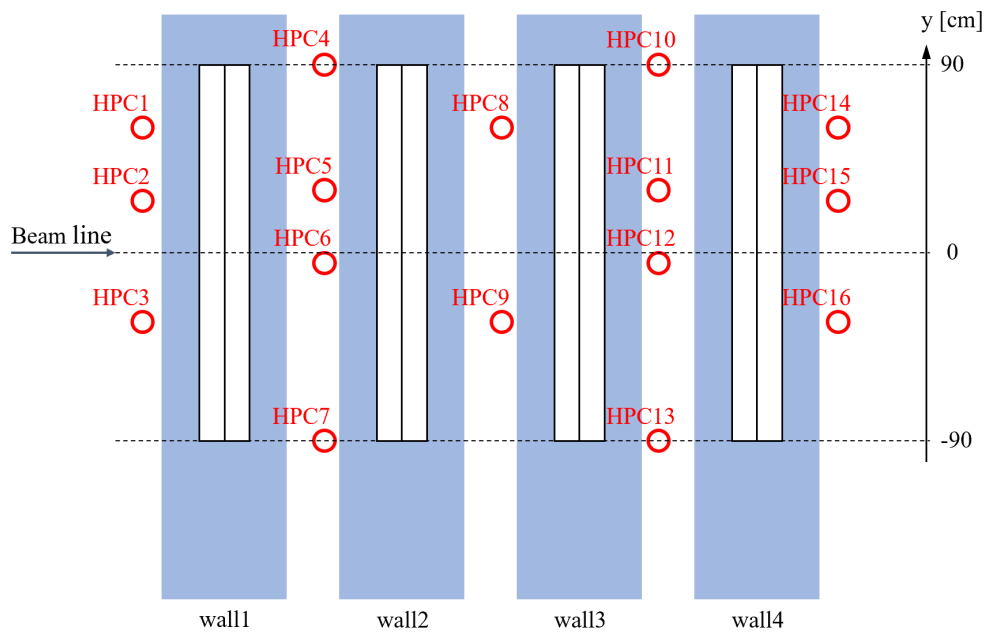


図 3.5 NEBULA、NEBULA Plus における HPC の配置。

表 3.2 HPC 配置

HPC 番号	1	2	3	4	5	6	7	8
位置 y [cm]	60.0	25.0	-33.0	90.0	30.0	-5.0	-90.0	60.0
HPC 番号	9	10	11	12	13	14	15	16
位置 y [cm]	-33.0	90.0	30.0	-5.0	-90.0	60.0	25.0	-33.0

3.2.3 中性子の検出方法

プラスチックシンチレータ上下に取り付けた光電子増倍管でシンチレーション光を信号として検出する。このとき上下の光電子増倍管に到達した光の時間 T_u 、 T_d を記録する。中性子の検出位置について、 x, z 座標は検出器モジュール位置から決定される。 y 座標はシンチレータ上下の PMT の時間差から求められる。シンチレータ内での光の伝播速度を v_s として

$$y = y_0 + \frac{v_s}{2}(T_d - T_u) \quad (3.1)$$

と位置 y が求められる。 y_0 はオフセットである。

3.2.4 中性子とプラスチックシンチレータの反応

中性子は電荷を持たないため、直接検出器で観測することができない。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などの原子核と反応することがある。この反応で生じた反跳陽子が電磁相互作用によりシンチレーション光を放出することで間接的に中性子を検出することができる。

中性子とプラスチックシンチレータ内の C、H との具体的な反応は、図 3.5 より以下の通りである。

- (i) $n+p \rightarrow n+p$ (弾性散乱)
- (ii) $n+^{12}\text{C} \rightarrow n+p+^{11}\text{B}$ (準弾性散乱)
- (iii) $n+^{12}\text{C} \rightarrow n+^{12}\text{C}$ (弾性散乱)
- (iv) $n+^{12}\text{C} \rightarrow \gamma(4.4\text{MeV})+X$
- (V) $n+^{12}\text{C} \rightarrow n+n+X$

(i) の反応は陽子との弾性散乱で、(ii) は炭素中の陽子との準弾性散乱である。図 3.5 より、プラスチックシンチレータ内では (i)(ii) の反応が支配的となる。

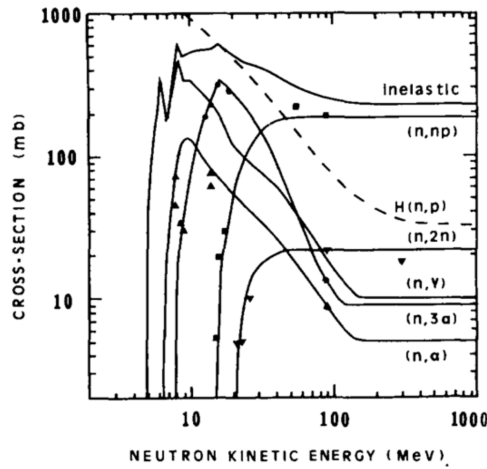


図 3.6 中性子と ^{12}C または H との反応断面積 [10]。破線：H との反応、実線： ^{12}C との反応を示す。

3.3 信号処理回路

3.3.1 NEBULA

NEBULA における簡略化した信号処理回路のブロックダイアグラムを図 3.6 に示す。

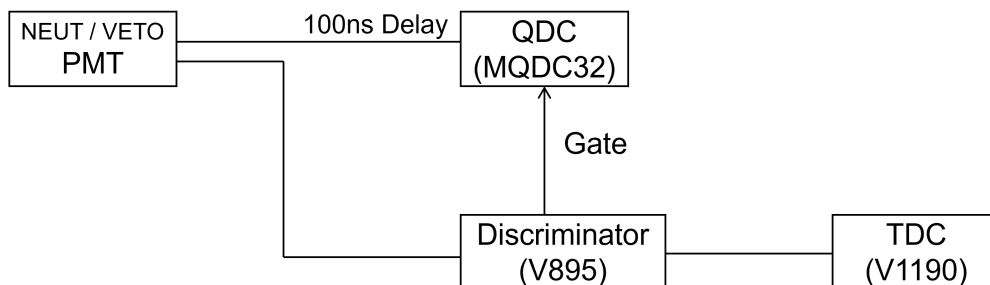


図 3.7 NEBULA の信号処理回路

PMT からはタイミング信号とアナログ信号の 2 つの信号が出力される。Delay Splitter で信号を分けた後、以下の 3 つの処理が行われる。

- Discriminator(V895) → TDC(V1190) で時間を記録する。
- Discriminator(V895) → QDC(MQDC32) に gate 信号が入力される。
- ケーブルによる遅延後 QDC(MQDC32) で gate 信号が入ったときのみ波形を積分し、波高を記録する。

信号処理において、以下主要な 3 つのモジュールについて説明する。

Discriminator

ノイズを除去し、波高分別を行う。入力する信号が閾値の電圧を超えた時に一定時間のパルスが出力される。CAEN 社製の V895 モジュールを使用している。閾値は NEUT : -25 mV、VETO : -15 mV に設定した。

TDC

TDC(Time Digital Converter) は、入力された Start 信号と Stop 信号の時間差をデジタル値に変換することで、時間の記録を行う装置である。TDC は CAEN 社製の V1190 モジュールを使用している。

QDC

入力信号の電圧を時間積分してその信号が含む電荷量を割り出し、デジタル値に変換することで波高を記録する。NEBULA では Mesytec 社製の MQDC32 モジュールを使用してパルスの電荷量を取得している。

さらに、Discriminator に通した信号は多重加算器 Σ (16CH 2-Fold Coincidence) において同時に出力するモジュールの数を定めることでマルチプリシティトリガーを生成し、定めた数以上の検出器がタイミング情報を発した場合のみトリガー信号を作り出す。そして TDC、QDC ではトリガー信号が送られてきたときのみ信号処理を行う。

データ収集システム (DAQ)

DAQ(Data Acquisition System) は信号処理系で処理された各検出器のアナログ、タイミング情報をイベントごとに収集・保存するシステムのことである。NEBULA では理化学研究所で開発された 'babirl' を使用する。

BUSY 制御

DAQ がデータの取得、保存を行っている間は新たにデータを取得できないため BUSY 信号を生成する。BUSY 信号が発生しているときトリガー信号は作られず、データ終了時に解除信号が送られることで再びトリガー生成可能となる。

3.3.2 NEBULA Plus

NEBULA Plus では FASTER と呼ばれるモジュール内で信号処理とデータ収集両方を行う。FASTER の QDC-TDC 数値計算モジュールは、トリガーモジュール、QDC など構成される。トリガーモジュールには主にスレッシュホールド Discriminator と CFD(constant fraction discriminator) が含まれる。測定において CFD の閾値は -10mV と設定した。マルチプリシティ

は $M \geq 8$ としている。トリガーマジュールでイベントが検出されると、2 ns の精度でタイムスタンプとして時間が記録される。QCD では信号処理の電荷量とタイミングを記録する処理が行われている。設定で $-24 \sim 250$ ns の範囲の電荷を足し上げた値を全電荷量 Q としている。特徴としては、トリガー信号の有無に関わらず全イベントのデータを記録できる。そのため、NEBULA Plus で同一のイベントと思われる複数のデータをグループ化する必要がある。

第 4 章

解析結果

4.1 NEBULA 単体での測定

NEBULA の位置較正を行う前に NEBURA の信号処理を担うモジュール TDC、QDC 自体も較正が必要である。本節では以下の 3 つの較正について述べる [11]。

- (i) TDC の時間較正
- (ii) QDC のペDESTAL補正
- (iii) 中性子検出器 y 方向の位置較正

4.1.1 TDC の時間較正

TDC はタイミング信号の積分値をデジタル値 (ch 値) として取得する。ch 値を実時間 (単位 : ns) に変換するために、Time Calibrator モジュールを用いて、スタートとストップが $20 \times k$ ns (k は自然数) となる信号を発生させ、この時間情報を取得する。この信号を TDC に入力すると、20 ns ごとに鋭いピークが立つ。このピークのチャンネル値をガウシアンフィッティングから求めることで較正される。図 4.1 は Time Calibrator の較正前の TDC スペクトルとなり、図 4.2 が較正後の TDC スペクトルとなる。較正によって TDC のチャンネル値を実時間に変換することができた。

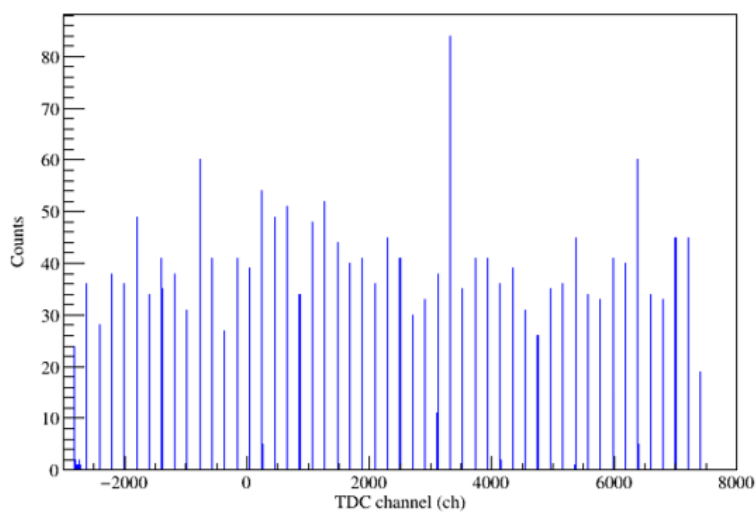


図 4.1 TDC キャリブレーションのデータの較正前の TDC スペクトル。

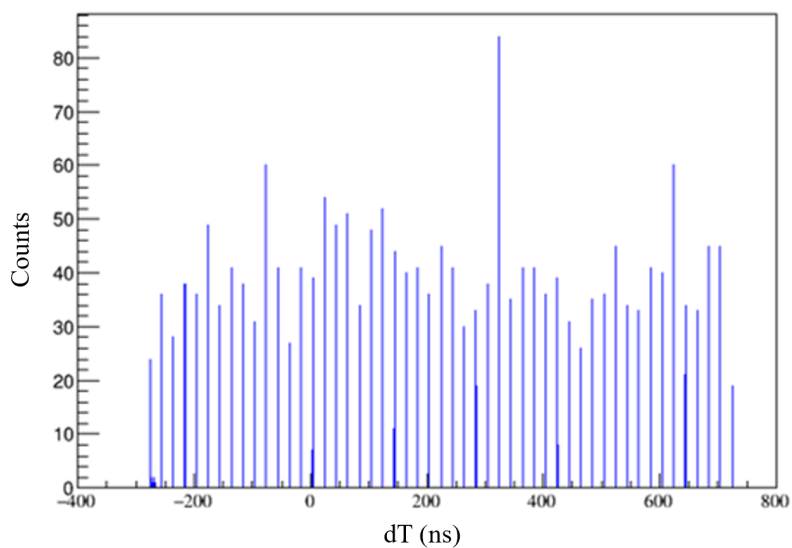


図 4.2 較正後の TDC スペクトル。ピークの本数が 50 本、間隔が 20ns となっている。横軸は実時間 (単位: ns) に変換された。

4.1.2 QDC のペDESTAL除去

QDC は入力された信号の波形を積分し、積分値をデジタル値に変換するモジュールである。入力信号がない場合理想的にの QDC の積分値は 0 となるが、実際はペDESTALと呼ばれる入力信号に依存しない一定の値が出力される。

本実験ではクロック信号 (1 kHz) をトリガーとして、QDC に PMT からの信号が入力されてい

ない状態でペダスタルのデータを取得した。得られた QDC 値のスペクトルを図 4.3 に示す。各信号ごとに QDC スペクトルをガウシアンでフィッティングを行い、その中央値をペダスタルとして取得した。ペダスタル補正後の QDC スペクトルは図 4.4 となり、QDC 値からペダスタル値を引くことで無信号時の QDC チャンネル値がエネルギーのゼロ点に対応するように補正した。

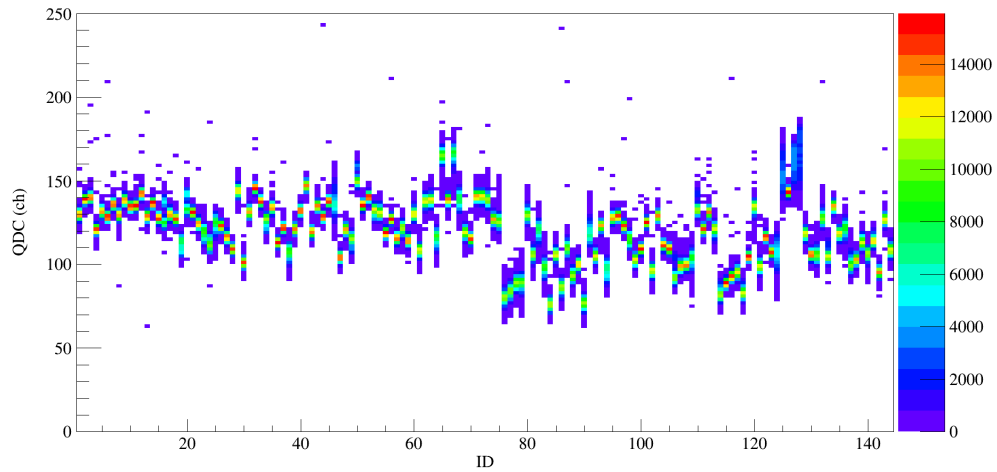


図 4.3 ペダスタル補正前の QDC スペクトル。各検出器の鉛直上側の PMT の信号を入力している。ID=1~120：中性子検出器、ID=121~144：VETO 検出器である。

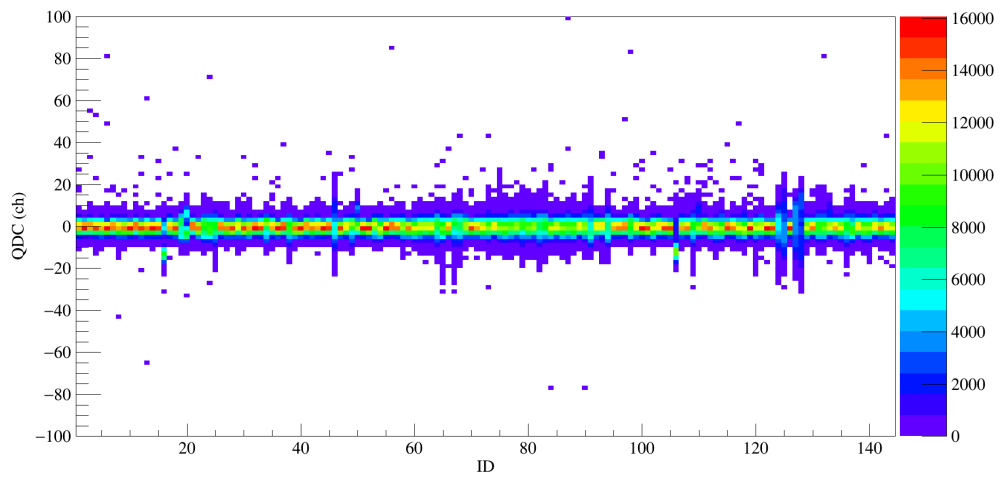


図 4.4 ペダスタル補正後の QDC スペクトル。

4.1.3 位置較正

実験方法

鉛直方向の位置 y の較正は HPC を併用し、宇宙線のイベントを利用して行う。宇宙線 (μ 粒子) を用いるのは、以下の3つの理由からである。

- ・常に利用可能である。
- ・宇宙線として主に検出される μ 粒子は荷電粒子のため、検出効率が高い。
- ・高エネルギーを持ち、エネルギー損失しても速度が変わらずほぼ光速として見なせる。

中性子検出器において鉛直方向の検出位置 y は、シンチレータ上下の PMT から送られる信号の時間差 $dT = T_d - T_u$ とシンチレータ内での光の伝播速度 v_s を用いて

$$y = y_0 + \frac{v_s}{2} dT \quad (4.1)$$

と変換される。 y_0 はオフセットである。ここで中性子検出器 ID=60 で測定した宇宙線の dT 分布を図 4.5 に示す。

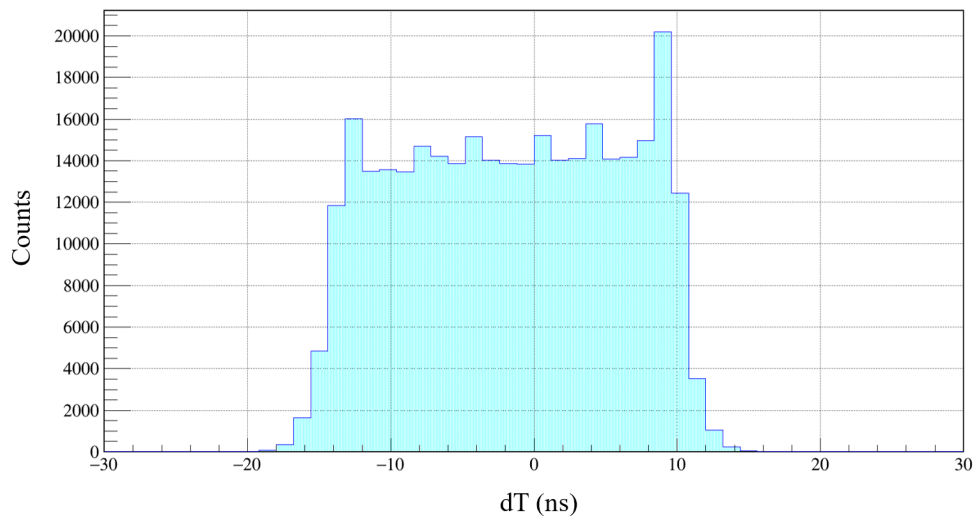


図 4.5 ID=60 の NEUT で測定した宇宙線の dT 分布。

dT はヒストグラムの立ち上がりとしち下がりについて半値幅をとると約-15 ns から 11 ns の範囲に分布している。これはシンチレータの長さ 180 cm に対応している。そのためプラスチックシンチレータ両端の位置 y と dT を一致させれば $y-dT$ の線型な関係を求めることができる。dT 分布の中心が 0 からずれているのは、PMT 中での電子の走行時間の違いやケーブル長の違いなどがあることから T_u 、 T_d にオフセットがあり、またシンチレータの有感領域が座標系に正確に対応しているとは限らない。そこで比例計数管 HPC(Horizontal Proportional Counter) のコインシデン

スを利用して宇宙線の飛跡を限定し、そのイベントを用いて位置較正を行う。

宇宙線の飛跡を同定するために選択した HPC のコインシデンスの組み合わせは、
wall3 : (8,10),(8,11),(8,12),(9,11),(9,12),(9,13) 計 6 点
wall4 : (10,14),(10,15),(11,14),(11,16),(12,14),(12,16),(13,16) 計 7 点
とした。以降、宇宙線が通過する 2 本の HPC の組み合わせを HPC ゲートと呼ぶ。

実験結果

HPC(8,10)、HPC(9,13) を通るような宇宙線の dT 分布はそれぞれ図 4.6、図 4.7 のようになった。wall3 の検出器において宇宙線の検出位置 y が最大となるような HPC ゲートが HPC(8,10)、 y が最小となるゲートが HPC(9,13) である。宇宙線のピークに対してガウシアンフィッティングを行うことで、各 HPC ゲートにおける y 方向の検出位置が求められる。

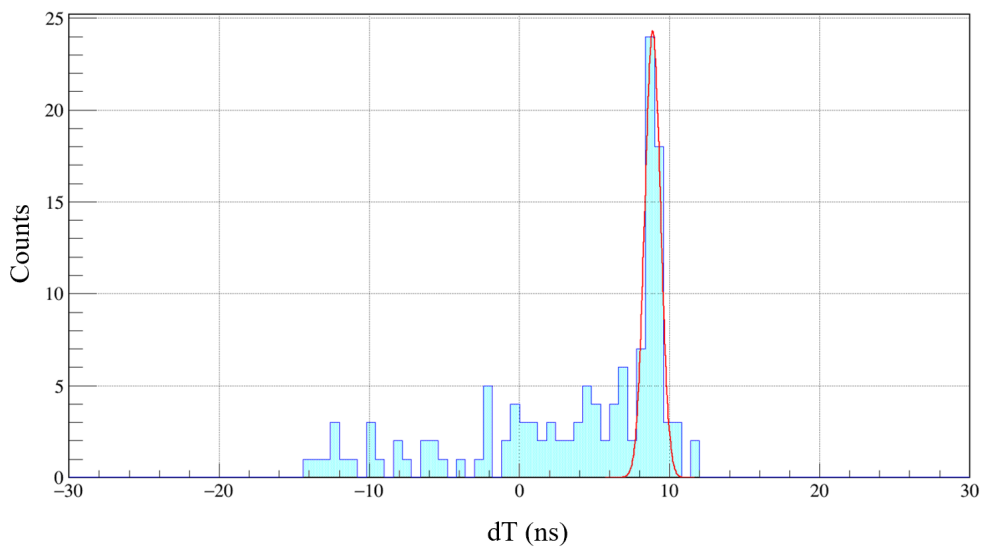


図 4.6 HPC(8,10) を通過する宇宙線の dT 分布。宇宙線の飛跡は中性子検出器上部を通過すると考えられる。赤線はピークの頂点から ± 3 ns の範囲をガウシアンフィッティングした線である。

ID=60 の中性子検出器における各 HPC ゲートにおける dT 分布のガウシアンフィッティングの結果を表 4.1 に示す。

HPC の配置より幾何学的に計算した宇宙線が検出器中を通過する位置 y とガウシアンフィッティングによる dT (平均 μ) との関係を図 4.8 に示す。フィッティングした直線の傾きは $v_s/2 = 7.26 \pm 3.83 \times 10^{-2}$ cm/ns ($v_s \sim 1.45 \times 10^8$ m/s)、 y 切片は $y_0 = 14.1 \times 10 \pm 2.38 \times 10^{-1}$ cm という結果が得られた。

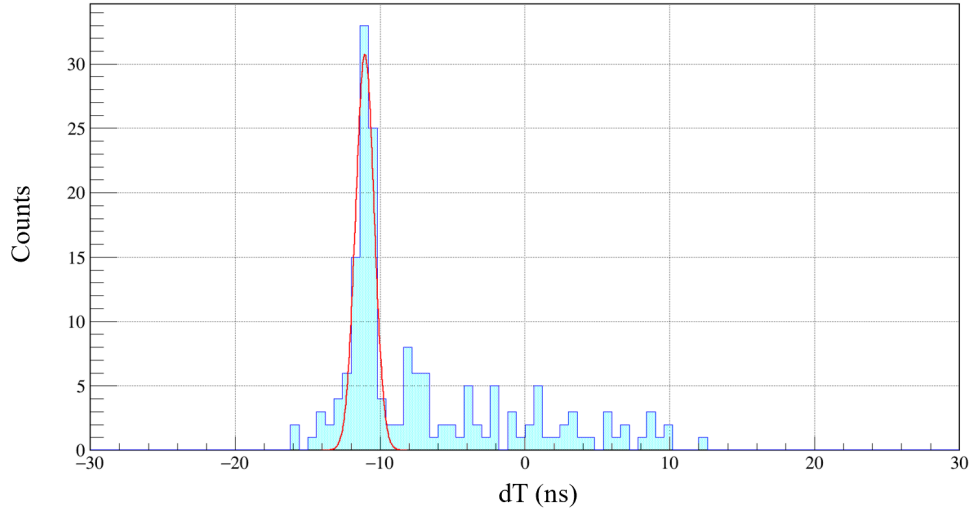


図 4.7 HPC(9,13) を通過する宇宙線の dT 分布。宇宙線の飛跡は中性子検出器下部を通過すると考えられる。赤線は図 4.6 のときと同様にガウシアンフィッティングした線である。

表 4.1 各 HPC ゲートごとの dT 分布におけるガウシアンフィッティングの結果 (ID=60)

HPC ゲート	平均 μ (ns)	標準偏差 σ (ns)
(8,10)	8.874 ± 0.073	0.523 ± 0.074
(8,11)	3.742 ± 0.108	0.845 ± 0.124
(8,12)	1.135 ± 0.062	0.642 ± 0.072
(9,11)	-1.608 ± 0.068	0.522 ± 0.080
(9,12)	-4.211 ± 0.203	1.301 ± 0.439
(9,13)	-11.059 ± 0.081	0.640 ± 0.087

よって y - dT グラフにおける一次関数のパラメータ $y_0, v_s/2$ が取得できるため、6つの較正点によって dT (ns) と検出位置 y (cm) の関係が定まり位置較正可能である。

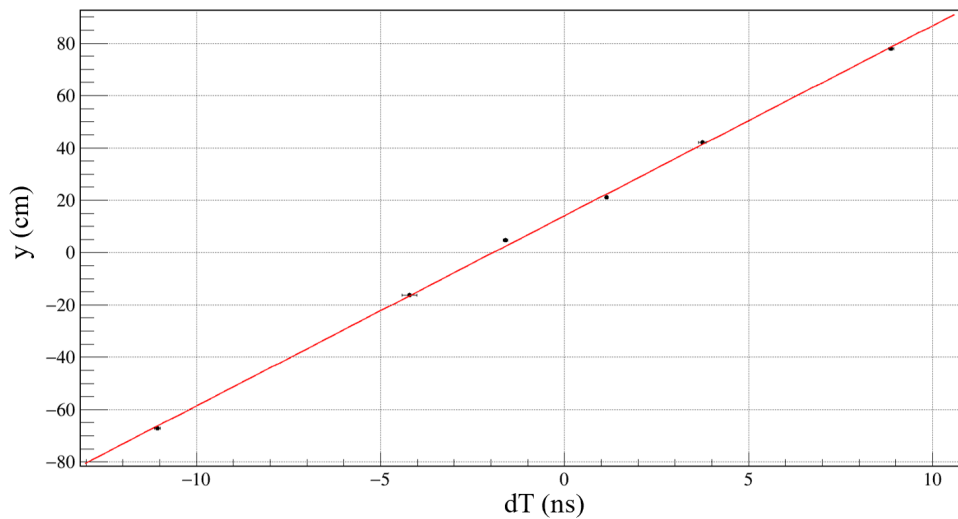


図 4.8 位置 y と時間差 dT 。赤線は一次関数フィッティングを行った。この直線の傾きが $v_s/2$ 、 y 切片が y_0 に対応する。

4.2 NEBULA と NEBULA Plus のデータマージ

4.2.1 NEBULA Plus 単体の宇宙線測定

NEBULA Plus 単独で宇宙線を測定したデータを示す。NEBULA Plus の宇宙線の dT 分布は図 4.9 のようになった。NEBULA のときと同様に dT 分布の両端について半値幅をとると、 $-17 \sim 7$ ns の範囲に宇宙線の分布が見られ、これがシンチレータの長さ 180 cm に対応している。

次に宇宙線測定における検出器上側の PMT からの信号の電荷積分値 Q と dT の関係を図 4.10 に示す。 $Q = 100 \times 10^3$ に見られるピークがシンチレータ内における宇宙線のエネルギー損失に対応している。また dT 分布両端について、宇宙線がシンチレータを掠めるような飛跡の場合エネルギー損失は小さくなり、 Q が小さい値でもピークが見られたと考えられる。

4.2.2 NEBULA Plus+HPC の宇宙線測定

NEBULA Plus の開発において、NEBULA と同様に検出器鉛直方向の位置較正を行う。NEBULA、HPC の DAQ(データ収集システム) と NEBULA Plus の DAQ が異なるため、それぞれで計測したイベントは時間情報を持つタイムスタンプを用いて一致させなければならない。

NEBULA Plus 側の HPC ゲート (1,6) をかけたイベントと NEBULA Plus 側の中性子検出器 ID=4 を通過するようなイベントについてマージを行うと、宇宙線の dT 分布は図 4.11 のようになった。

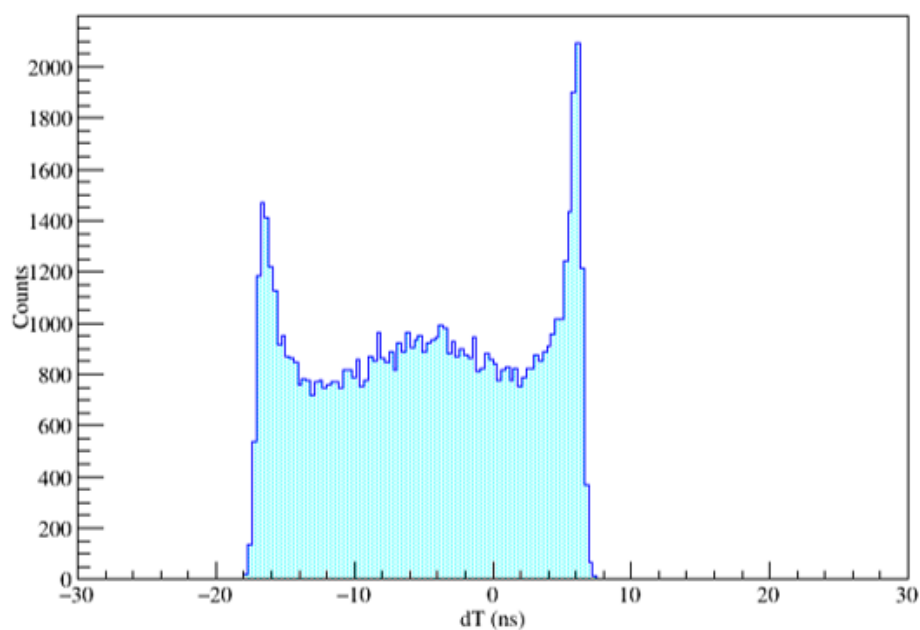


図 4.9 NEBULA Plus における宇宙線の dT 分布。

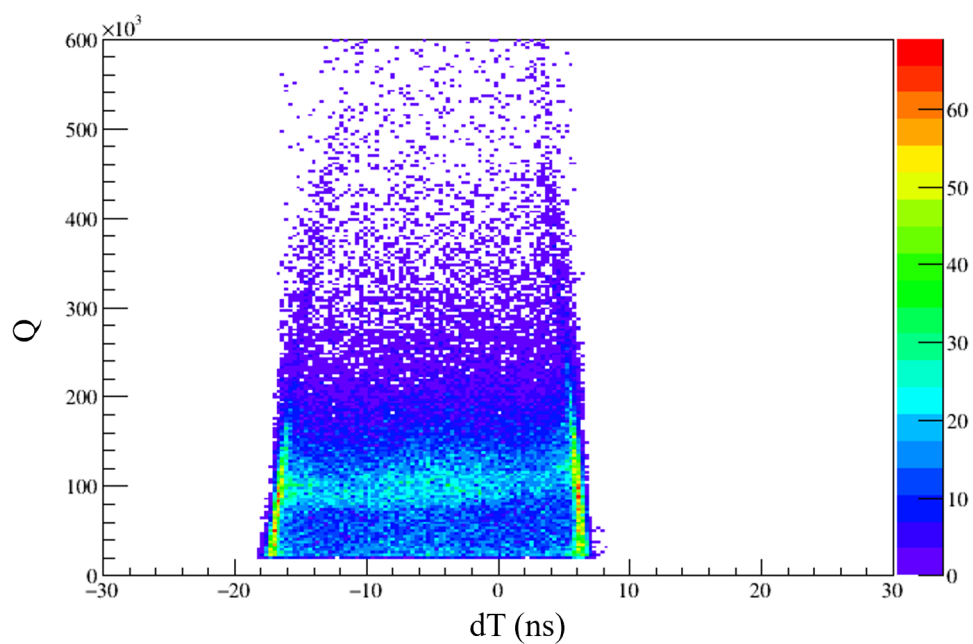


図 4.10 電荷 Q の dT 分布。 Q は QDC で取得した電荷量であり、検出器内でのエネルギー損失に相当する。

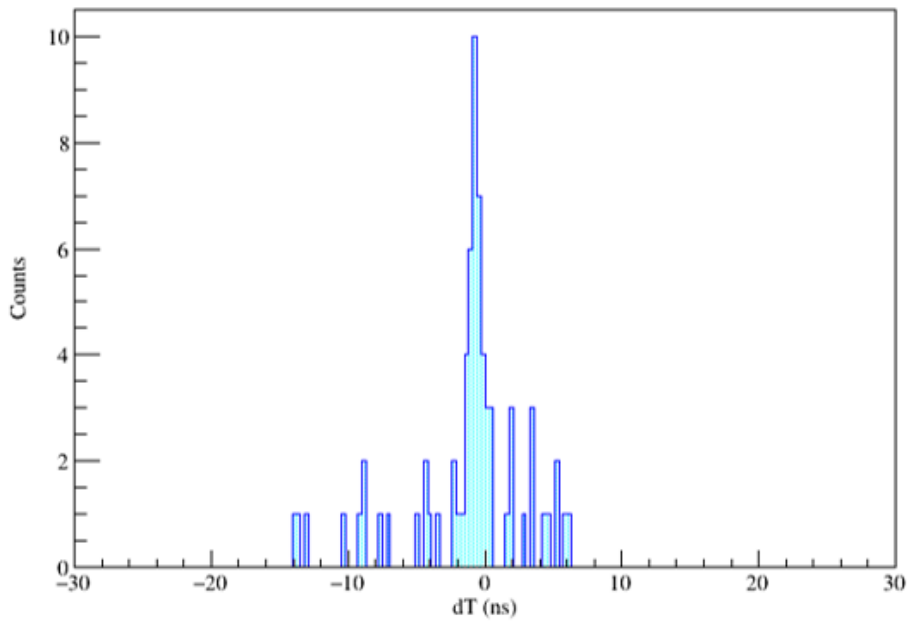


図 4.11 NEBULA Plus における HPC(1,6) を通過するときの宇宙線の dT 分布。

グラフにおいて NEBULA 同様に宇宙線イベントのピークが見られたことから、NEBULA と NEBULA Plus 側のデータのマージができていることが確認できた。NEBULA Plus の解析では、宇宙線の計測時間 2 時間のデータを使用したためイベント数がかなり少なくなっている。今後測定時間を長く取得したデータを用いて統計量を増やし、得られたグラフのピークに対して精度よくガウシアンフィッティングすることで NEBULA Plus についても位置較正が可能となる。

第 5 章

まとめと今後の展望

本研究では、中性子検出器 NEBULA Plus の開発において中性子検出器鉛直方向の位置較正を行った。測定には宇宙線を利用し、比例計数管 HPC のコインシデンスをとることで宇宙線の飛跡を限定させ検出位置を割り出した。このとき検出器鉛直方向位置 y と上下の光電子増倍管からの信号の時間差 dT の関係が定まり、シンチレータ内の光の伝播速度 $v_s \sim 1.45 \times 10^8$ が得られた。NEBULA Plus の位置較正についても NEBULA 同様の宇宙線イベントのピークが見られたことから、NEBULA と NEBULA Plus のデータのマージができたことを確認した。今後 NEBULA Plus の開発を進めるにあって、NEBULA と NEBULA Plus の較正 (slew 補正など)、性能や分解能評価を行う。

今後 NEBULA Plus を用いる実験としては、理化学研究所重イオン加速器施設 RIBF において不安定核 ^{27}O の共鳴状態に関する実験が計画されている。 ^{27}O は束縛核 ^{24}O と 3 中性子に崩壊する。この実験では欠損質量法を用いるため、NEBULA Plus を用いて 3 中性子の同時検出を行う。その他の実験について、NEBULA Plus は使用しないが不変質量法を用いたテトラニュートロンの探索実験が計画されている。しかし将来的にテトラニュートロンを欠損質量法で観測するためにも NEBULA Plus の 4 中性子検出効率の向上を目指して開発を進めていく必要がある。

参考文献

- [1] 中村隆司, 不安定核の物理 中性子ハロー・魔法数異常から中性子星まで, 共立出版 (2016)
- [2] T. Nakamura et al., Phys.Rev.Lett.**96**, 252502 (2006)
- [3] Y. kondo et al., Phys.Rev.Lett.**116**, 102503 (2016)
- [4] K. Hagino, H. Sagawa, Phys.Rev.C, **89**, 014331 (2014)
- [5] F. M. Marques et al., Phys.Rev.C **65**, 044006 (2002)
- [6] K. Kisamori et al., Phys. Rev. Lett. **116**, 052501 (2016)
- [7] T. Faestermann et al., Phys. Lett. B **824**, 136799 (2022)
- [8] M. Duer et al., Nature Vol 606 (2022)
- [9] T. Kobayashi et al., Nucl. Instrum. Meth. B.**317** 294 (2013)
- [10] R.A.Cecil et al.,Nucl.Instr.and Meths. **161**,439 (1979)
- [11] 佐古貴行, 修士論文 (2011) 東京工業大学.

謝辞

本研究を進めるにあたって、多くの方々からご指導、助言をいただきました。指導教官である中村隆司教授には、原子核物理の知識の他、プレゼンテーションの仕方など多岐にわたってご教授いただきました。助教の近藤洋介氏には、解析を行う上でアドバイスや本論文を書く際にも丁寧な添削や多くの助言をいただきました。大澤悠真氏、Lee Hyeji 氏にも解析や研究室生活において助けられてきました。中村研の松井智樹氏、堀川晃太氏、礒部駆氏には研究室では大変お世話になりました。そして同期の石黒宗一郎氏にも研究において励まされてきました。研究生生活を支えてくださった方々に心より感謝いたします。