

2023 年度 修士論文

中性子過剰核における短距離相関対探索のための
後方散乱重陽子検出器の開発

東京工業大学 理学院 物理学系

学籍番号 22M00243

氏名 礒部 駆

指導教員 中村隆司

2024 年 2 月 5 日

概要

本論文では、短距離相関した陽子-中性子対 (SRC pair: Short Range Correlation pair) の探索実験で用いる重陽子検出器の開発とその性能について述べる。SRC ペアは核子半径より近接した陽子-中性子対であり、従来の殻模型や平均場模型では説明できない、フェルミ運動量を超える相対運動量を持つ。陽子における SRC ペアの割合が N/Z 比に大きく依存することが安定核の電子散乱実験で示されたがその原因は十分には解明されていない。また、一核子分離反応における分光学的因子の減少問題の解決が求められているが、この減少率にも陽子・中性子の非対称度の依存性があり、SRC の関与が指摘されている。そこで、我々は不安定核ビームを用いて大きな N/Z 比の核に対して系統的に SRC 観測することを目指している。その最初の実験として、 $^{10}\text{Be}(p, pd)^8\text{Li}$ 反応を用いた不安定核に対して世界初となる SRC 観測実験を理研 RIBF で行うべく準備を行っている。不安定核の実験に電子散乱の手法は適用できないため、本研究では逆運動学を用いて不安定核を水素標的に入射させることで重陽子ノックアウト反応 (p, pd) を起こし、この反応における三重微分断面積から SRC を議論する。

本研究では $^{10}\text{Be}(p, pd)^8\text{Li}$ 反応実験で使用する後方散乱重陽子検出器の開発と性能評価を行った。宇宙線を測定することで BSD のゲインの調整を行い、ADC と Time over Threshold (TOT) の対応関係を調べ TOT の非線形性の補正を行った。また、大阪大学核物理研究センターで行った性能評価実験では TOT のデータを用いて粒子識別を行った。 $\Delta E - E$ プロットにおいて陽子と重陽子を約 4σ 分離することができた。加えて、粒子の入射位置依存性を補正することで陽子と重陽子を約 6σ で分離することができた。

abstract

This paper describes the development and performance of a deuteron detector for use in short-range correlated proton-neutron (SRC) pair search experiment. SRC pairs are proton-neutron pairs closer than the nucleon radius and have relative momenta beyond the Fermi momentum that cannot be explained by the conventional shell model or mean field model. Electron scattering experiments on stable nuclei have shown that the fraction of SRC pairs in the proton strongly depends on the N/Z ratio, but the cause of this dependence is not fully understood. The problem of the reduction of spectroscopic factors in a nucleon separation reactions is also required to be solved, but the rate of reduction also depends on the proton-neutron asymmetry, and the involvement of SRC has been pointed out. Therefore, we are aiming to systematically observe SRC for nuclei with large N/Z ratios using an unstable nuclear beam. As the first step, we are preparing to perform the world's first SRC observation experiment for unstable nuclei using the $^{10}\text{Be}(p, pd)^8\text{Li}$ reaction at RIBF. Since the electron scattering technique cannot be applied to experiments with unstable nuclei, we will use inverse kinematics to induce the deuteron knockout reaction (p, pd) by injecting unstable nucleus beam into hydrogen target, and discuss SRC from the triple differential cross section in this reaction.

In this study, I developed and evaluated the performance of a backward scattering deuteron detector used in the $^{10}\text{Be}(p, pd)^8\text{Li}$ reaction experiment. By measuring cosmic rays, the gain of BSD was adjusted, and the correspondence between ADC and Time over Threshold (TOT) was investigated to correct for the nonlinearity of TOT. And particle identification was performed using TOT data in the experiment conducted at the Research Center for Nuclear Physics, Osaka University. Proton and deuteron could be separated by about 4σ on a $\Delta E - E$ plot. In addition, proton and deuteron could be separated by about 6σ by correcting for the dependence of the incident position of the particles.

目次

第 1 章	序論	1
1.1	フェルミガス模型	1
1.2	一粒子軌道占有率	3
1.3	SRC ペア	4
1.4	不安定核中の SRC 探索	11
第 2 章	実験原理	13
2.1	$^{10}\text{Be}(p, pd)^8\text{Li}$ 反応	13
2.2	三重微分断面積	16
2.3	$^{10}\text{Be}(p, pd)^8\text{Li}$ 反応における陽子・重陽子の散乱角度	17
第 3 章	実験セットアップ	19
3.1	BigRIPS	19
3.2	SAMURAI	21
3.3	標的前検出器系	22
3.4	液体水素標的	23
3.5	前方散乱検出器系	25
3.6	SAMURAI 磁石	30
3.7	後方散乱検出器系	31
3.8	残留核測定器系	36
第 4 章	後方散乱重陽子検出器 BSD	40
4.1	シンチレーション検出器の原理	40
4.2	BSD の構成要素	43
4.3	検出器と NIM-EASIROC の組み合わせ	50
4.4	要求性能	51
第 5 章	BSD の開発と性能評価	52
5.1	プロトタイプ検出器の性能評価	52
5.2	BSD の開発	56
5.3	BSD の性能評価実験	61
第 6 章	まとめと今後の展望	82

6.1	まとめ	82
6.2	今後の課題と展望	83
付録 A		88
A.1	各 EASIROC と検出器の ID の組み合わせ	88
A.2	各 EASIROC の印加電圧	91
A.3	各 EASIROC のペDESTAL	93
A.4	TOT と ADC の相関のフィッティングパラメータ	95
参考文献		99

目次

1.1	フェルガス模型での核子の運動量分布	2
1.2	$(e, e'p)$ 反応から得られた原子核の質量数に対する分光学的因子の値	3
1.3	Gade プロット	4
1.4	χ_B の関数としての収量の実験値と SRC を含むモデルの理論予測	5
1.5	核内の SRC ペアの割合	6
1.6	電子散乱断面積比 (中性子ノックアウト反応/陽子ノックアウト反応) の N/Z 依存性	7
1.7	中性子と陽子それぞれの ^{12}C に対する相対的な高運動量と低運動量のイベント数比	8
1.8	2 核子系の模式図	9
1.9	安定核 ^{16}O を用いた (p, pd) 反応	10
1.10	$\theta_d = 8.6^\circ / \theta_p = 138.4^\circ$ のときの $^{16}\text{O}(p, pd)^{14}\text{N}$ の励起エネルギースペクトル	10
1.11	^{14}N の準位図	11
2.1	順運動学での $^{10}\text{Be}(p, pd)^8\text{Li}$ 反応の反応機構の模式図	14
2.2	ビームエネルギー 135 MeV/u による $p + d$ 弾性散乱の微分断面積	14
2.3	逆運動学での $^{10}\text{Be}(p, pd)^8\text{Li}$ 反応の反応機構の模式図	15
2.4	^8Li の準位図	16
2.5	SRC ペアが存在するときの $^{10}\text{Be}(p, pd)^8\text{Li}$ の三重微分断面積の模式図	17
2.6	$^{10}\text{Be}(p, pd)^8\text{Li}$ 反応における陽子・重陽子の散乱角度とエネルギーの相関	18
3.1	RIBF の概観	19
3.2	BigRIPS の概観	20
3.3	実験セットアップと前方散乱粒子の飛跡	21
3.4	実験セットアップと後方散乱粒子の飛跡	22
3.5	BDC1,2 の概観	23
3.6	液体水素標的のチェンバーの概観および断面図	24
3.7	バッファータンクの設計図	24
3.8	標的セルの設計図	25
3.9	標的セルの蓋の設計図	25
3.10	FSD と CATANA の側面図	26
3.11	FSD を上面から見たときのシンチレータの配置	27
3.12	FSD で使用しているシンチレータ 1 本の概観	27
3.13	FSD の構造	28

3.14	標的中心からの FSD のヒットパターン	28
3.15	CATANA の全体図	29
3.16	CATANA と標的の位置関係	30
3.17	SAMURAI 磁石の概観	31
3.18	BSD の概観	32
3.19	NINJA の概観	33
3.20	PDC の概観	34
3.21	HODP の概観	35
3.22	FDC1 の概観	36
3.23	FDC2 の概観	37
3.24	NEBULA の概観	39
4.1	プラスチックシンチレータ EJ-200 における荷電粒子のエネルギーと発生する光子数の関係	41
4.2	フォトダイオードの PN 接合の状態	41
4.3	アバランシェ増倍の模式図	42
4.4	MPPC の回路図	43
4.5	BSD の概観	43
4.6	BSD の ΔE 検出器に使用しているシンチレータの概観	44
4.7	BSD の E 検出器に使用しているシンチレータの概観	44
4.8	浜松ホトニクス製 S13360-3025CS	45
4.9	浜松ホトニクス製 S13360-6025CS	45
4.10	S13360-3025CS と S13360-6025CS の検出効率	46
4.11	浜松ホトニクス製 S13360-3025CS の外形寸法図	46
4.12	浜松ホトニクス製 S13360-6025CS の外形寸法図	46
4.13	ΔE 検出器で用いた PCB の設計図	47
4.14	E 検出器で用いた PCB の設計図	47
4.15	図 4.13 で示した PCB の回路図	47
4.16	図 4.14 で示した PCB の回路図	47
4.17	EASIROC の内部回路の概要	48
4.18	HOLD トリガーのタイミングによる保存される電荷情報の違い	49
4.19	TDC の記録の概念図	50
4.20	陽子と重陽子が BSD に入射した際の $\Delta E - E$ プロット	51
5.1	MPPC1 から得らデータにフィッティングを行った図	54
5.2	MPPC2 から得らデータにフィッティングを行った図	54
5.3	MPPC3 から得らデータにフィッティングを行った図	54
5.4	式 5.9 より得られたヒストグラムにフィッティングした図	55
5.5	ペDESTAL 測定で得られたヒストグラム	56
5.6	宇宙線を測定した際の BSD のセットアップ	57
5.7	BSD で宇宙線を測定した際の回路図	58

5.8	宇宙線を測定した際の ΔE 検出器の ADC スペクトル	59
5.9	宇宙線を測定した際の E 検出器の ADC スペクトル	59
5.10	ΔE 検出器の TOT と ADC の相関	60
5.11	E 検出器の TOT と ADC の相関	60
5.12	$A(p, pX)$ 反応実験のセットアップ	61
5.13	$A(p, pX)$ 反応実験のセットアップの拡大図	63
5.14	RCNP で行った実験での回路図 (前半)	64
5.15	RCNP で行った実験での回路図 (後半)。	64
5.16	条件 1,2,3 での ΔE と E の相関	67
5.17	条件 4 での ΔE と E の相関	67
5.18	条件 1,2,3,4 での ΔE と E の相関	67
5.19	TOT データでの E_{dif} の一次元ヒストグラム	67
5.20	TOT データでの E_{dif} の一次元ヒストグラム	67
5.21	BSD を上面から見た図	71
5.22	条件 1 における MPPC78 の TOT_{cor}	72
5.23	条件 4 における、MPPC72,74,76,78,80,82,84 でゲートをかけた時の MPPC15 の TOT の分布	73
5.24	条件 4 における、MPPC72,74,76,78,80,82,84 でゲートをかけた時の MPPC16 の TOT の分布	73
5.25	条件 4 における、MPPC72,74,76,78,80,82,84 でゲートをかけた時の MPPC17 の TOT の分布	73
5.26	条件 1 における MPPC78 の TOT_{cor}	74
5.27	条件 1,2,3 での ΔE と E の相関	76
5.28	条件 1,2,3,4 での ΔE と E の相関	76
5.29	TOT'_{cor} での E_{dif} の一次元ヒストグラム	76
5.30	TOT'_{cor} での E_{dif} の一次元ヒストグラム	76
5.31	条件 1,2,3 での ΔE と E の相関	77
5.32	条件 1,2,3,4 での ΔE と E の相関	77
5.33	TOT'_{cor} での E_{dif} の一次元ヒストグラム	77
5.34	TOT'_{cor} での E_{dif} の一次元ヒストグラム	77
5.35	条件 1,2,3,4 における MPPC74 でゲートをかけた時の MPPC16 と MPPC15 の TOT の相関	80
5.36	条件 1,2,3,4 における MPPC78 でゲートをかけた時の MPPC16 と MPPC15 の TOT の相関	80
5.37	条件 1,2,3,4 における MPPC84 でゲートをかけた時の MPPC16 と MPPC15 の TOT の相関	80
5.38	条件 1,2,3,4 における MPPC74 でゲートをかけた時の MPPC16 と MPPC15 の TOT の相関	81
5.39	条件 1,2,3,4 における MPPC78 でゲートをかけた時の MPPC16 と MPPC15 の TOT の相関	81
5.40	条件 1,2,3,4 における MPPC84 でゲートをかけた時の MPPC16 と MPPC15 の TOT の相関	81
6.1	BigRIPS で 50 MeV/u の重陽子を分離した際の液体水素標的に入射する粒子の収量	84
6.2	$p + d$ 弾性散乱での散乱角度とエネルギー	84
6.3	$p + {}^3\text{He}$ 弾性散乱での散乱角度とエネルギー	84

表目次

3.1	BDC1,2 で使用しているワイヤー等の仕様	23
3.2	BDC1,2 の仕様	23
3.3	FSD の仕様と性能	27
3.4	FSD におけるヒットパターンと検出角度	29
3.5	CATANA の層ごとの検出範囲	30
3.6	SAMURAI 磁石の性能	31
3.7	BSD の仕様と性能	33
3.8	NINJA の仕様と性能	34
3.9	PDC1,2 で使用しているワイヤー等の仕様	34
3.10	PDC1,2 の仕様	35
3.11	HODP の仕様と性能	36
3.12	FDC1 で使用しているワイヤー等の仕様	37
3.13	FDC1 の仕様	37
3.14	FDC2 で使用しているワイヤー等の仕様	38
3.15	FDC2 の仕様	38
3.16	HODF24 の仕様と性能	38
3.17	NEBULA の仕様	39
4.1	EJ-200 の特性	44
4.2	S13360-3025CS の性能	45
4.3	S13360-6025CS の性能	45
5.1	プロトタイプ検出器の各 MPPC の 1 MeV での分解能 a (MeV)	55
5.2	宇宙線を測定した際の EASIROC1 の設定	58
5.3	宇宙線を測定した際の EASIROC2 の設定	58
5.4	宇宙線を測定した際の EASIROC3 の設定	59
5.5	TOT と ADC の相関を測定した際の EASIROC1 の設定	59
5.6	TOT と ADC の相関を測定した際の EASIROC2 の設定	60
5.7	TOT と ADC の相関を測定した際の EASIROC3 の設定	60
5.8	LAS の性能	62
5.9	RCNP での実験の条件	62
5.10	BSD に入射する粒子と BSD でのエネルギー損失	63

5.11	RCNP で行った実験での EASIROC1 の設定	65
5.12	RCNP で行った実験での EASIROC2 の設定	65
5.13	RCNP で行った実験での EASIROC3 の設定	65
5.14	TOT データにおける E_{dif} の分解能	68
5.15	TOT データにおける E_{dif} の分解能	69
5.16	条件 1 における各 MPPC のフィッティング結果と補正のための定数 a_k	72
5.17	入射位置依存性を補正するための定数 $b_{l,m}$	75
5.18	TOT' _{cor} での E_{dif} の分解能	77
5.19	TOT' _{cor} での E_{dif} の分解能	78
6.1	$p + d$ 弾性散乱における散乱粒子の BSD でのエネルギー損失	85
6.2	$p + ^3\text{He}$ 弾性散乱における散乱粒子の BSD でのエネルギー損失	85
6.3	$p + d$ 弾性散乱において BSD に入射する粒子の重心系での散乱角度と微分断面積	85
6.4	$p + ^3\text{He}$ 弾性散乱において BSD に入射する粒子の重心系での散乱角度と微分断面積	85
6.5	BSD に入射する粒子の計数率	86
A.1	EASIROC1 の使用するチャンネルと検出器の ID の組み合わせ	88
A.2	EASIROC1 の使用するチャンネルと検出器の ID の組み合わせ (続き)	89
A.3	EASIROC2 の使用するチャンネルと検出器の ID の組み合わせ	89
A.4	EASIROC3 の使用するチャンネルと検出器の ID の組み合わせ	90
A.5	EASIROC1 の印加電圧	91
A.6	EASIROC2 の印加電圧	92
A.7	EASIROC3 の印加電圧	92
A.8	EASIROC1 の各チャンネルのペDESTAL	93
A.9	EASIROC2 の各チャンネルのペDESTAL	94
A.10	EASIROC3 の各チャンネルのペDESTAL	94
A.11	EASIROC1 の各チャンネルについて式 (5.10) でフィッティングをして得られたパラメータ	95
A.12	EASIROC2 の各チャンネルについて式 (5.10) でフィッティングをして得られたパラメータ	96
A.13	EASIROC3 の各チャンネルについて式 (5.10) でフィッティングをして得られたパラメータ	97

第1章

序論

原子核の基本的な性質は独立粒子模型によって理解される。独立粒子模型は平均場近似で記述され、核子は核内を独立に運動しているとみなす。核子は一粒子軌道を占有し原子核全体は一粒子軌道波動関数の重ね合わせで記述できる。独立粒子模型のひとつである殻模型によって魔法数が説明されるなど、原子核物理学において独立粒子模型は核構造を理解するために重要な概念である。

独立粒子模型は原子核の性質をよく記述できる一方で、それでは説明できない現象も存在することが知られている。陽子・中性子の短距離相関対 (SRC: Short Range Correlation pair) は独立粒子模型では説明できない現象であり、近年特に注目を集めている。SRC ペアは核子半径 0.86 fm より近距離で相関した系であり、特に陽子における形成割合は N/Z 比に大きく依存することが安定核の電子散乱実験で示された [6]。一方、一核子分離反応における分光学的因子の減少問題 [2] の解決が求められているが、この減少率にも陽子・中性子の非対称度の依存性があり [3]、SRC の関与が指摘されている。序論では SRC ペアの研究についての意義や背景を述べるために、原子核の標準的な模型の一つである独立粒子模型、その中で最も単純なフェルミガス模型について述べ、フェルミガス模型と比較した SRC ペアの特徴や SRC ペアの先行研究について述べる。また、不安定核を SRC ペアの研究に用いる意義についても述べる。

1.1 フェルミガス模型

フェルミガス模型は独立粒子模型のもっとも単純な模型であり、原子核内の核子同士の相互作用を完全に無視するモデルである。フェルミガス模型では運動量空間と等価な $\mathbf{k} = \mathbf{P}/\hbar$ であらわされる波数ベクトル空間を用いる。原子核の体積 V の中にある核子は波数ベクトル \mathbf{k} 空間では半径 k_F (フェルミ波数) の球 (フェルミ球) の中で、 $(2\pi)^3/V$ の間隔で 2 個ずつ詰まっているものとみなせる。この「2 個」というのは核子のスピン方向の自由度に対応している。このことから状態数 n は

$$n = 2 \frac{V}{(2\pi)^3} \int d\mathbf{k} = 2 \frac{V}{(2\pi)^3} \int_0^{k_F} 4\pi k^2 dk = \frac{V k_F^3}{3\pi^2} \quad (1.1)$$

である。 n は核子数に対応し、 $n = N$ (中性子数) ないし $n = Z$ (陽子数) である。これよりフェルミ波数 k_F は

$$k_F = (3\pi^2 \rho)^{1/3} \quad (1.2)$$

となる。ここで $\rho = n/V$ であり密度を表す。フェルミエネルギーはフェルミ運動量に対応するエネルギー (核子の運動エネルギーの最大値) として定義され、核子の質量を m とすると

$$\epsilon_F = \frac{\hbar^2 k_F^2}{2m} = \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 \rho)^{2/3} \quad (1.3)$$

である。

陽子数と中性子数が等しい、すなわち $n = Z = N = \frac{A}{2}$ である原子核についてフェルミ波数、フェルミ運動量およびフェルミエネルギーはそれぞれ

$$k_F = \left(3\pi^2 \frac{A}{2V}\right)^{1/3} \quad (1.4)$$

$$P_F = \hbar \left(3\pi^2 \frac{A}{2V}\right)^{1/3} \quad (1.5)$$

$$\epsilon_F = \frac{\hbar^2}{2m} \left(3\pi^2 \frac{A}{2V}\right)^{2/3} \quad (1.6)$$

となる。これらに核子数密度 $A/V = 0.17 \text{ fm}^{-3}$ を代入すると、

$$k_F = 1.36 \text{ fm}^{-1} \quad (1.7)$$

$$P_F = 268 \text{ MeV}/c \quad (1.8)$$

$$\epsilon_F = 38 \text{ MeV} \quad (1.9)$$

となる。フェルミガス模型の運動量分布は図 1.1 のようにフェルミ運動量 P_F を超えたところで 0 となる。

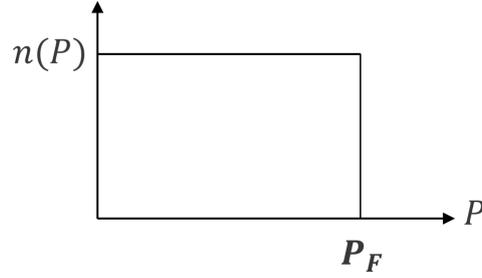


図 1.1: フェルミガス模型での核子の運動量分布

陽子数と中性子数が異なる場合にその非対称度 $\delta = (N - Z)/A$ を導入すると陽子と中性子のそれぞれのフェルミ波数 k_{Fp}, k_{Fn} は

$$k_{Fp} = \left(3\pi^2 \frac{Z}{A}\right)^{1/3} = \left(3\pi^2 \frac{A}{2V} \frac{2Z}{A}\right)^{1/3} = k_F (1 - \delta)^{1/3} \quad (1.10)$$

$$k_{Fn} = \left(3\pi^2 \frac{N}{A}\right)^{1/3} = \left(3\pi^2 \frac{A}{2V} \frac{2N}{A}\right)^{1/3} = k_F (1 + \delta)^{1/3} \quad (1.11)$$

となる。したがって核子当たりの運動エネルギー ϵ は次のようになる。

$$\begin{aligned} \epsilon &= \frac{Z}{A} \frac{3}{5} \frac{\hbar^2 k_{Fp}^2}{2m} + \frac{N}{A} \frac{3}{5} \frac{\hbar^2 k_{Fn}^2}{2m} \\ &= \frac{3}{5} \epsilon_F \left(\frac{1-\delta}{2} (1-\delta)^2 + \frac{1+\delta}{2} (1+\delta)^2 \right) \\ &= \frac{3}{5} \epsilon_F + \frac{1}{3} \epsilon_F \delta^2 + O(\delta^4) \end{aligned} \quad (1.12)$$

これより運動エネルギーの寄与による対称エネルギーは

$$\frac{1}{3}\epsilon_F = 13 \text{ MeV} \quad (1.13)$$

となる。Bethe-Weitzsäcker の質量公式による経験的な対称エネルギーの値は 23.3 MeV[1] であり、フェルミガス模型で無視した核力による寄与が 10 MeV ほど存在することになる。このことからフェルミガス模型では原子核を正確に記述できないことが分かる。

1.2 一粒子軌道占有率

フェルミガス模型は原子核の性質を理解するうえで重要であるが十分ではない。殻模型は独立粒子模型の中でも原子核の性質を精度よく計算できるが完全ではない。一例として、一粒子軌道の占有率が殻模型での計算より小さいことがあげられる。図 1.2 は様々な質量数の安定核に対して電子による一陽子ノックアウト反応 ($e, e'p$) を用いて求めた分光学的因子である。横軸は標的の質量数、縦軸は規格化された分光学的因子 (一粒子軌道占有率) を表している [2]。一粒子軌道占有率は平均場中に一核子が存在している状態を表しており、独立粒子模型ではこの値が 1 になる。殻模型計算では分光学的因子を核子間の相関も入れて計算しているが、実験で得られる断面積は、殻模型計算で計算された分光学的因子で予想される断面積の 0.6~0.7 倍でありこの減少率を Reduction Factor(減少因子) とよんでいる。図 1.3 は Gade プロットと呼ばれ、一核子分離反応における実験で測定された断面積と殻模型に基づき計算される理論的な断面積との比を表している。横軸は分離エネルギーの差 ΔS を表し、陽子を分離する場合は $\Delta S = S_p - S_n$ 、中性子を分離する場合は $\Delta S = S_n - S_p$ としている。 ΔS が大きくなるほど、測定された断面積と理論値の比は小さくなり、最大で 20% 程度まで減少する。このメカニズムはいまだに明らかにされていない。このメカニズムの一つが SRC であると考えられており、SRC の割合が陽子・中性子の非対称度でどのように変化するか、定量的に系統的に調べる必要がある。

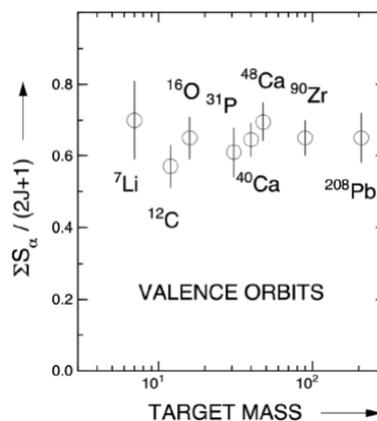


図 1.2: ($e, e'p$) 反応から得られた原子核の質量数に対する規格化された分光学的因子の値 [2]。横軸は標的核の質量数、縦軸は分光学的因子を表す。

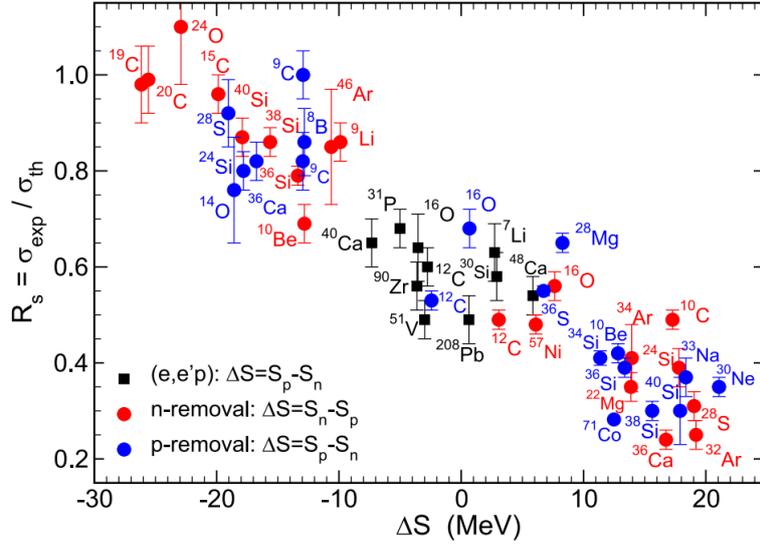


図 1.3: それぞれの原子核に対する、一核子分離反応における断面積の測定値と計算値の比 R_s [3]。横軸は一陽子 (中性子) 分離エネルギーと一中性子 (陽子) 分離エネルギーの差を表し、縦軸は断面積の測定値と計算値の比を表す。赤 (青) 丸は中性子 (陽子) 分離反応に対応しており、黒い四角は電子による陽子分離反応のデータを示している。

1.3 SRC ペア

近年の研究により核内の核子の一部は短距離で相関した SRC ペアを形成することが明らかにされている。この現象は殻模型を超えた現象であり、前節で述べたように一粒子軌道占有率の減少機構を解明する手掛かりになると期待されている。先行研究により SRC ペアは以下の性質を持つことが示されている。

1. 核子半径より近距離で相関する
2. フェルミ運動量 k_F より大きな相対運動量を持つ
3. SRC ペアは pn ペアが支配的で、 pp ペアや nn ペアは少ない
4. pn ペアはスピン $S = 1$ 、アイソスピン $T = 0$ が支配的
5. テンソル相互作用が支配的

これまでの SRC についての研究は電子散乱を用いて安定核に対して行われてきた。この節では SRC の先行研究の詳細について述べる。K. S. Egiyan 氏は核内の核子の高運動量成分が SRC ペアを起源とすることに矛盾がないことを実験的に示した [4]。彼らは ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{56}\text{Fe}$ を標的とした電子散乱 $A(e, e')$ を用いてインクルーシブな散乱断面積を求めた。図 1.4 は横軸に χ_B (Bjorken scaling variable)、縦軸に標的核 ${}^3\text{He}$ を用いた時の収量に対する、標的核 A を用いた時の収量の比 $R(A, {}^3\text{He})$ を示している。 χ_B の定義は以下の通りである。

$$\chi_B = \frac{Q^2}{2M\nu} \quad (1.14)$$

$$Q: \text{四元運動量移行} \quad (1.15)$$

$$M: 1 \text{ 核子の質量} \quad (1.16)$$

$$\nu: \text{エネルギー移行} \quad (1.17)$$

曲線は SRC が支配的になるというモデルの予測を示しており、データとよく一致している。このことから核内の高運動量成分は SRC が支配的であることと、その運動量分布はどの原子核でも同じ形状をすることを明らかにした。

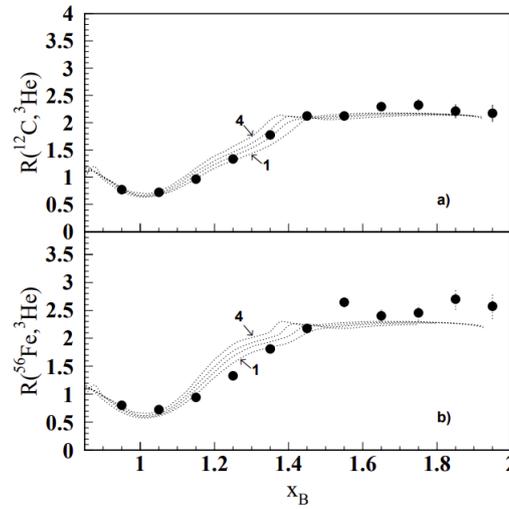


図 1.4: $1.4 < Q^2 < 2.6 \text{ GeV}^2$ での χ_B の関数としての ${}^3\text{He}$ を用いた時の収量に対する、標的核 A を用いた時の収量の比 $R(A, {}^3\text{He})$ 。点線は $1.4 \sim 2.6 \text{ GeV}^2$ の異なる Q^2 での SRC を含むモデルの予測値 [4]。

R. Subedi 氏らは電子を原子核に入射させ、核子をノックアウトする実験 [5] を行った。この実験により ${}^{12}\text{C}$ 中で 20 % の核子はフェルミ運動量より大きい運動量を持ち SRC ペアを形成していることを明らかにした。図 1.5 は電子散乱実験 $(e, e'pp)$, $(e, e'pn)$ および $(p, 2pn)$ 実験から得られた ${}^{12}\text{C}$ における SRC ペアの割合を示す。縦軸は SRC ペアの割合を表し、横軸は Missing momentum [GeV/c] で核内の陽子の運動量に相当する。SRC ペアのうち pn ペアが $90 \pm 10 \%$ を占め、 pp ペアは $5 \pm 1.5 \%$ であることが明らかになり、また、アイソスピン対称性より nn ペアも $5 \pm 1.5 \%$ であると考えられる。 pn ペアが支配的である理由は後述する。

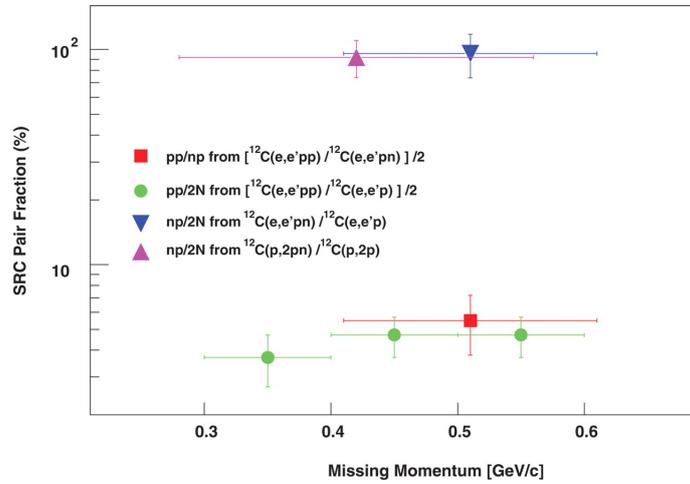


図 1.5: 電子散乱実験 $(e, e'pp)$, $(e, e'pn)$ および $(p, 2pn)$ 実験によって得られた ^{12}C における SRC ペアの割合 [5]。

M. Duer 氏らは異なる原子核標的を用いて電子散乱実験 [6] を行い、SRC ペアの割合の N/Z 依存性を示した。図 1.6 は標的核 A の N/Z と標的核 A に対する $(e, e'n)$ 反応と $(e, e'p)$ 反応の断面積比の相関を表している。図 1.6 において”Low momentum”はフェルミ運動量より小さい運動量、”High momentum”はフェルミ運動量より大きい運動量の核子についてのデータである。高運動量の核子を観測した際に $(e, e'n)$ 反応と $(e, e'p)$ 反応の断面積比は N/Z に依存せずほぼ 1 で一定であった。これは核内の高運動量の陽子数と中性子数が等しいことを示しており、高運動量の核子が SRC ペア由来であることと矛盾しない。一方、低運動量成分については N/Z が大きくなるほど $(e, e'n)$ 反応と $(e, e'p)$ 反応の断面積比は大きくなっており、中性子の断面積が陽子の断面積より大きくなることと矛盾しない。

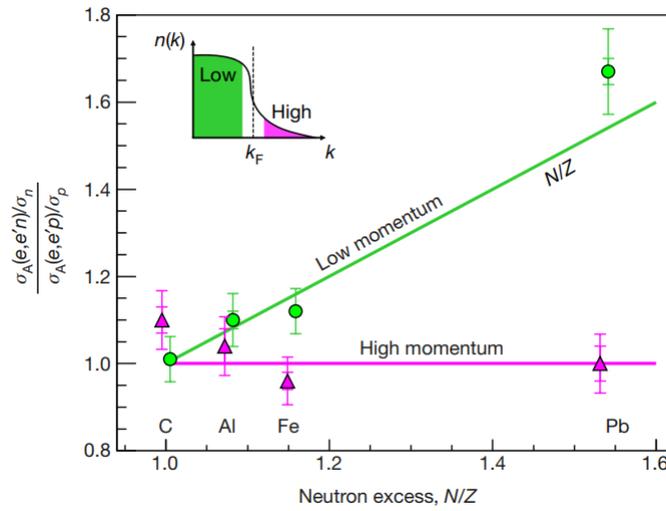


図 1.6: 電子散乱断面積比 (中性子ノックアウト反応/陽子ノックアウト反応) の N/Z 依存性 [6] 低運動量 (緑丸) と高運動量 (紫三角形) のイベントについての、中性子がノックアウトされる反応 ($e, e'n$) 反応と陽子がノックアウトされる反応 ($e, e'p$) の断面積比 $[\sigma_A(e, e'n)/\sigma_n]/[\sigma_A(e, e'p)/\sigma_p]$ を表す。 σ_n, σ_p は電子-中性子及び電子-陽子の弾性散乱断面積であり、それぞれ ($e, e'n$) 断面積、 ($e, e'p$) 断面積を割ることで規格化している。挿入図は、核子運動量分布を示しており、"low" と "high" はそれぞれフェルミ運動量より低運動量と高運動量を示している。

また、M. Duer 氏らは原子核内の陽子、中性子がそれぞれどの程度の割合で SRC ペアを形成するかを調べた。図 1.7 はそれぞれについて高運動量の核子数と低運動量の核子数の比をとり ^{12}C の比で規格化したものを示している。高運動量の核子は SRC ペアが起源とみなすことができるので、図 1.7 は ^{12}C と比較したときの SRC ペアの割合を示している。SRC ペアを形成する中性子の割合は N/Z に依存せず一定であるのに対し、 N/Z が大きいほど SRC ペアを形成する陽子の割合は大きくなっている。また、図 1.7 の挿入図は中性子数が陽子数より大きい核 (実線) と、中性子数と陽子数が等しい核 (破線) との運動量分布を示している。 $N/Z > 1$ の時には高運動量成分が増えるため、SRC ペアの形成には N/Z 依存性があると考えられる。

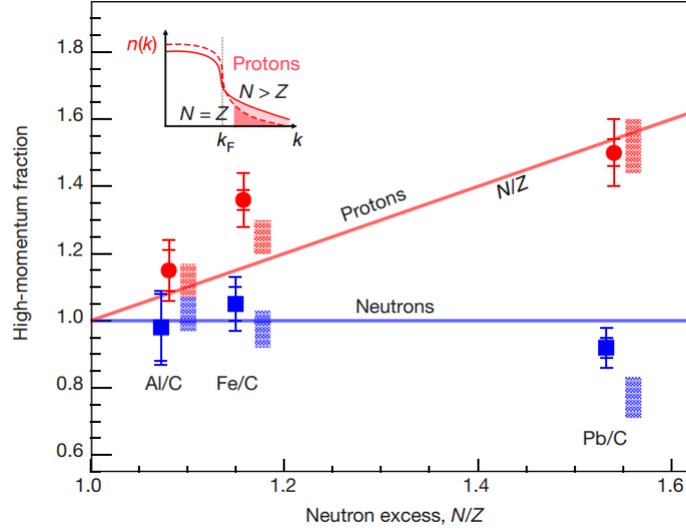


図 1.7: 中性子と陽子それぞれの ^{12}C に対する相対的な高運動量と低運動量のイベント数比 [6] 赤丸は $(e, e'p)$ 反応における ^{12}C でスケールした原子核 A の低運動量陽子数に対する高運動量陽子数の比 (二重比) を示している: $([\text{原子核 A の高運動量陽子}]/[^{12}\text{C の高運動量陽子}])/([\text{原子核 A の低運動量陽子}]/[^{12}\text{C の低運動量陽子}])$ 。内側の誤差棒は統計誤差によるものであり、外側の誤差棒は統計誤差と系統誤差の両方を含み、両方とも 1σ または 68% の信頼度を示している。青色の四角は中性子について陽子と同様に、 $(e, e'n)$ 反応における ^{12}C でスケールした原子核 A の低運動量中性子数に対する高運動量中性子数の比 (二重比) を示している。赤と青のハッチングされた四角は陽子と中性子の比それぞれに対する理論モデルの予測範囲を示している。赤線は傾きが 1 の直線、青線は $([\text{原子核 A の高運動量中性子}]/[^{12}\text{C の高運動量中性子}])/([\text{原子核 A の低運動量中性子}]/[^{12}\text{C の低運動量中性子}])=1$ の直線を表している。直線は、低運動量核子の場合には核内の中性子と陽子の数の比に対応する N/Z (傾き 1 の直線) を表し、高運動量核子の場合には陽子-中性子対モデルの予測 $([\sigma_A(e, e'n)/\sigma_n]/[\sigma_A(e, e'p)/\sigma_p] = 1)$ を示している。内側の誤差棒は統計誤差を示し、外側の誤差棒は統計誤差と系統誤差の両方を含んでいる。挿入図は中性子数と陽子数が等しい核 (破線) と中性子数が陽子数より大きい核 (実線) の運動量分布を示している。

寺嶋氏らの (p, pd) 反応を用いた実験 [8] により、SRC ペアは $S = 1, T = 0$ を持ちテンソル相互作用が支配的になっていることが示された。SRC ペアと深い関わりを持つテンソル相互作用について述べる。2 核子間の核力ポテンシャル $V(1, 2)$ の主要な成分は、2 核子間の距離 r の関数である中心力ポテンシャル $V_c(r)$ と、2 核子のスピンの向きと相対座標ベクトルの向きに依存する非中心力ポテンシャルの一種、テンソル力ポテンシャル $S_{12}V_T(r)$ 及びスピン軌道力ポテンシャル $V_{LS}(r)\mathbf{L} \cdot \mathbf{S}$ を用いて次のように書ける。

$$V(1, 2) = {}^{2S+1}V_c(r) + S_{12}V_T(r) + V_{LS}(r)\mathbf{L} \cdot \mathbf{S} \quad (1.18)$$

S_{12} はテンソル演算子であり、2 核子の相対座標を \mathbf{r} 、 $\hat{\mathbf{r}} = \mathbf{r}/r$ とし、パウリのスピン行列を $\boldsymbol{\sigma}$ とすると次のように書ける。

$$S_{12} = 3(\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \hat{\mathbf{r}})(\boldsymbol{\sigma}_2 \cdot \hat{\mathbf{r}}) - \boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma}_2 \quad (1.19)$$

2 核子系ではスピン $S = 0$ 、アイソスピン $T = 1$ 、または $S = 1, T = 0$ のみをとる。 $S = 0$ の場合は式 (1.19) に $\boldsymbol{\sigma}_1 = -\boldsymbol{\sigma}_2$ を代入して、

$$S_{12} = -(3/r^2)(\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \mathbf{r})^2 + (\boldsymbol{\sigma}_1)^2 = 0 \quad (1.20)$$

となり、テンソル力は 0 となる。一方、 $S = 1$ に対しては、 pn 間にテンソル力が働く。この時の核子間のテ

ンソル力ポテンシャルは

$$S_{12}V_T(r) = (3 \cos^2 \theta - 1)V_T(r) \quad (1.21)$$

となる。 θ は p, n のスピンの向きを z 軸にとった ($\sigma_1 = \sigma_2 = \hat{z}$) 時の、2 核子の相対座標 \mathbf{r} の向きと z 軸のなす角を表す。

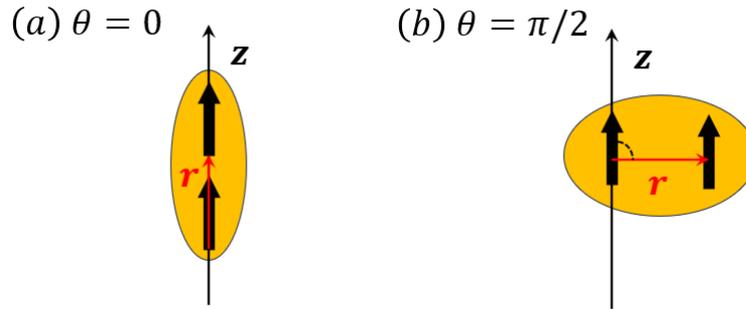


図 1.8: p と n のスピンの向きが同じ方向を向いている場合の模式図。 θ は核子のスピンの向きと 2 核子の相対座標ベクトル \mathbf{r} のなす角を表す。(a) $\theta = 0$ の時は最も強く引力が働く。(a) $\theta = \pi/2$ の時は最も強く斥力が働く。

$V_T(r)$ は負なので、 $\theta = 0$ のとき最大の引力となり、 $\theta = \pi/2$ のとき最大の斥力となる (図 1.8)。以上のことより 2 核子系では重陽子 ($S = 1, T = 0$) のみにテンソル相互作用が働く。

次に寺嶋氏らが行った実験 [8] について説明する。この実験では 392 MeV の陽子ビームを ^{16}O 標的に入射し、中性子ピックアップ反応を観測した。 ^{16}O は $N = Z = 8$ の偶々核であり、基底状態のスピン・パリティは $J^\pi = 0^+$ である。散乱する pn ペアが $S = 1, T = 0$ であった場合、残留核 ^{14}N の終状態は $J^\pi = 1^+, T = 0$ となる。一方で散乱する pn ペアが $S = 0, T = 1$ であった場合、残留核 ^{14}N の終状態は $J^\pi = 0^+, T = 1$ となる (図 1.9)。散乱に関与した pn ペアのスピン・アイソスピンによって散乱後の残留核の状態は異なるため、残留核の終状態を特定することで散乱に関与した pn ペアの状態を知ることができる。この実験で観測された ^{14}N の励起エネルギースペクトルを図 1.10 に示す。基底状態と励起エネルギーが 3.95 MeV の第二励起状態が明確なピークとして観測され、励起エネルギーが 2.31 MeV の第一励起状態による寄与は非常に小さい。 ^{14}N の準位図 (図 1.11) を見ると、基底状態と第二励起状態は $J^\pi = 1^+, T = 0$ 、第一励起状態は $J^\pi = 0^+, T = 1$ なので原子核内の相対運動量の大きな pn ペアは $S = 1, T = 0$ が支配的であることが分かる。 pn ペアの高運動量成分は SRC ペア由来であるため、SRC ペアは $S = 1, T = 0$ が支配的であり、テンソル相互作用が支配的であることが実験的に明らかにされた。

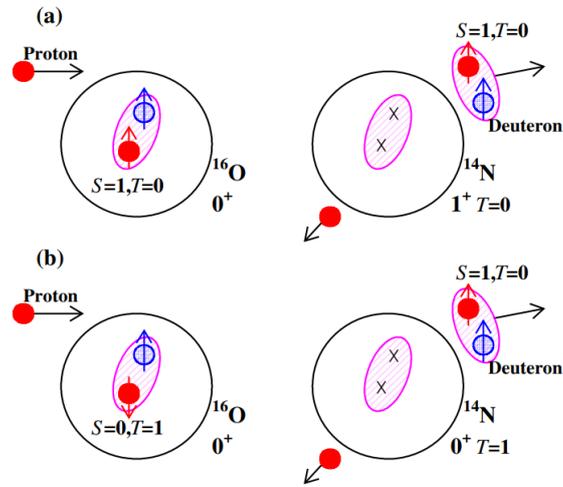


図 1.9: 安定核 ^{16}O を用いた (p, pd) 反応 [8]。 (a) ^{16}O 中の pn ペアのスピンのアイソスピンが $S = 1, T = 0$ の場合、 (b) ^{16}O 中の pn ペアのスピンのアイソスピンが $S = 0, T = 1$ の場合。

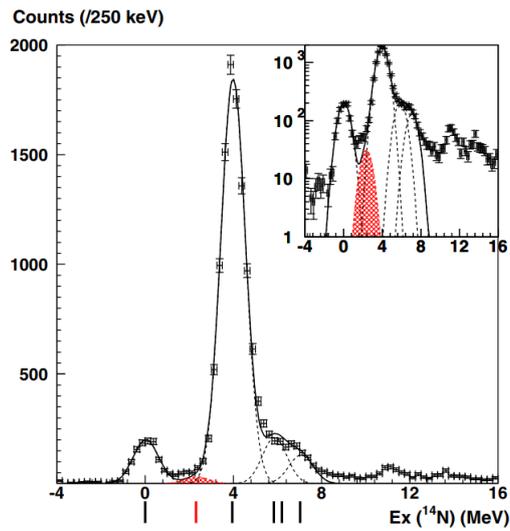


図 1.10: $\theta_d = 8.6^\circ / \theta_p = 138.4^\circ$ のときの $^{16}\text{O}(p, pd)^{14}\text{N}$ の励起エネルギースペクトル [8] 実線は全スペクトルについてフィッティングしたもので、破線は各ピークの成分についてフィッティングしたものを表している。図下の縦線は ^{14}N の基底状態及び励起状態のエネルギーを表す。赤の縦線は 2.31 MeV 第一励起状態のエネルギーを表す。

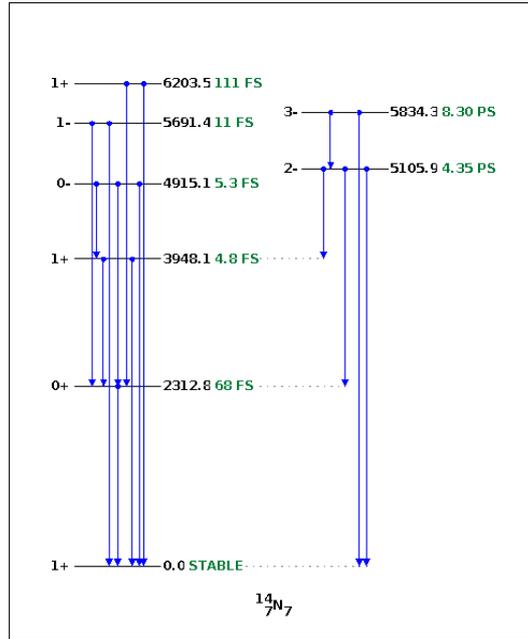


図 1.11: ^{14}N の準位図 [9]。準位線右の黒字は励起エネルギー (keV) を表し、緑字は半減期 $T_{1/2}$ を表す。下向きの青矢印はガンマ崩壊の遷移を表し、準位線左の数字は全スピンとパリティ J^π を表す。

1.4 不安定核中の SRC 探索

SRC ペアに関する先行研究は安定核に対して行われていたが、我々は不安定核中の SRC ペアを研究するための実験を計画している。不安定核を用いて SRC ペアの探索を行うことのモチベーションは主に 2 つある。1 つ目は SRC ペア形成の N/Z 依存性を定量的に評価することである。先行研究 [6] の N/Z 依存性の議論は N/Z の大きい ^{208}Pb の結果のみに大きく依存している。また、図 1.7 の直線はそれぞれ単に傾き 1 (赤) のものと一定 (青) のものを表しているだけでデータのフィッティングによるものではない。そのため SRC ペア形成の N/Z 依存性の議論は定量的なものではない。SRC ペアの N/Z 依存性を定量的に評価するためにさまざまな N/Z を持つ原子核、特に大きな N/Z を持つ原子核に関するデータが必要となる。より大きな N/Z を持つ原子核について調べるためにも不安定核について実験を行うことは不可欠である。

モチベーションの 2 つ目は不安定核における陽子と中性子のフェルミ面の違いが SRC ペアに影響を及ぼすかどうかを調べることにある。安定核の多くは陽子と中性子のフェルミ面はほぼ等しいが、不安定核に関しては大きく異なるものもある。このことが SRC ペア形成にどのように影響を与えるかを調べることで一核子分離反応に関する未解明問題を解決することが大きな目標である。

我々は寺嶋氏らが行った (p, pd) 反応を逆運動学の条件下で行い不安定核に応用することで $^{10}\text{Be}(p, pd)^8\text{Li}$ 反応実験を行うことを計画している。 ^{10}Be の N/Z は 1.5 で ^{208}Pb の 1.53 とあまり変わらず、より大きな N/Z について研究する目的ではない。不安定核中の SRC 研究の第一歩として ^{10}Be について研究する。実験は理化学研究所 RIBF で行う。本実験では 230 MeV/u の ^{10}Be を液体水素標的に入射し $p, d, ^8\text{Li}$ を生成する。これらの粒子は、多種粒子測定装置 SAMURAI (Superconducting Analyzer for Multi-particle from Radio Isotope Beams) と荷電粒子検出群によって同時検出を行う。本論文では $^{10}\text{Be}(p, pd)^8\text{Li}$ 反応実験で使用する

後方散乱重陽子 (BSD) の開発および性能評価について述べる。第 2 章では $^{10}\text{Be}(p, pd)^8\text{Li}$ 反応の実験手法、第 3 章では実験セットアップについて述べる。第 4 章では後方散乱重陽子検出器 (BSD) の概要について述べ、第 5 章では大阪大学核物理研究センターで行った BSD のテスト実験について述べる。最後に第 6 章では本論文のまとめと今後の課題と展望について述べる。

第 2 章

実験原理

本章では、不安定核における (p, pd) 反応を用いた SRC ペア探索実験の原理について説明し、三重微分断面積および散乱粒子の角度とエネルギーについて述べる。

2.1 $^{10}\text{Be}(p, pd)^8\text{Li}$ 反応

本実験では 230 MeV/u の ^{10}Be ビームを液体水素標的に入射させ、 $^{10}\text{Be}(p, pd)^8\text{Li}$ 反応を逆運動学の条件で測定する。この反応は $p + d$ の準弾性散乱とみなすことができる。散乱イベントは、 $p + d$ 散乱の重心系での散乱角度 $\theta_{c.m.}$ が小さい前方散乱と散乱角度が大きい後方散乱に大別される。図 2.1 は順運動学での $^{10}\text{Be}(p, pd)^8\text{Li}$ 反応の反応機構を模式的に示している。入射陽子が原子核中の重陽子をノックアウトする反応が前方散乱にあたり、入射陽子が SRC ペアの中性子をピックアップする反応は後方散乱に対応する。SRC ペアは高運動量の成分を持っており、中性子の高運動量成分が入射陽子の運動量成分と一致したときにピックアップ反応が起こる。したがって、後方散乱を調べることで SRC を議論することができる。順運動学の場合、前方散乱を起こしたときには陽子と重陽子はともに前方に散乱され、後方散乱を起こしたときには陽子のみが後方に散乱する。 $p + d$ の準弾性散乱の断面積は図 2.2 のように正確に求められており、 $\theta_{c.m.}=120^\circ$ 付近で最少となり、 $\theta_{c.m.}=0^\circ$ 付近と $\theta_{c.m.}=180^\circ$ 付近で大きくなる。 $\theta_{c.m.}=0^\circ$ 付近は前方散乱、 $\theta_{c.m.}=180^\circ$ 付近は後方散乱に対応する。図 2.3 は逆運動学での $^{10}\text{Be}(p, pd)^8\text{Li}$ 反応の反応機構を模式的に示している。この場合には、前方散乱、後方散乱のどちらの場合でも陽子と重陽子は実験室系では前方に散乱するが、前方散乱は後方散乱に比べて散乱角度は大きい。

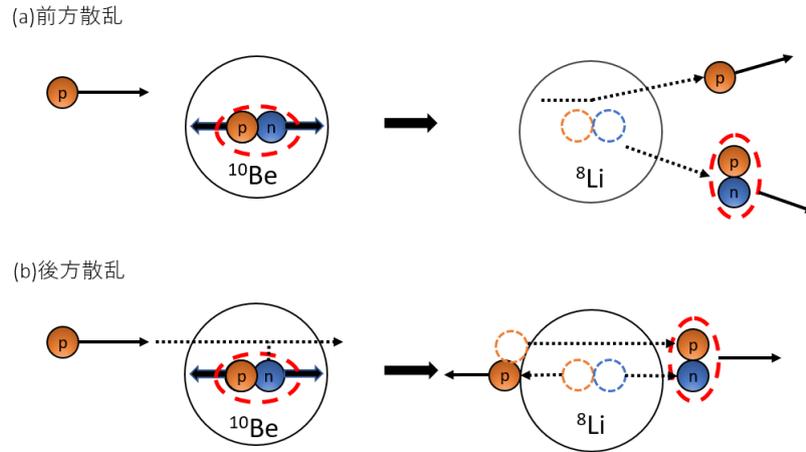


図 2.1: 順運動学での $^{10}\text{Be}(p, pd)^8\text{Li}$ 反応の反応機構の模式図。(a) 前方散乱は標的の陽子と核内の重陽子の準弾性散乱である。(b) 後方散乱では標的の陽子と SRC ペアを形成していた中性子の運動量が一致することで新たな重陽子が形成される。

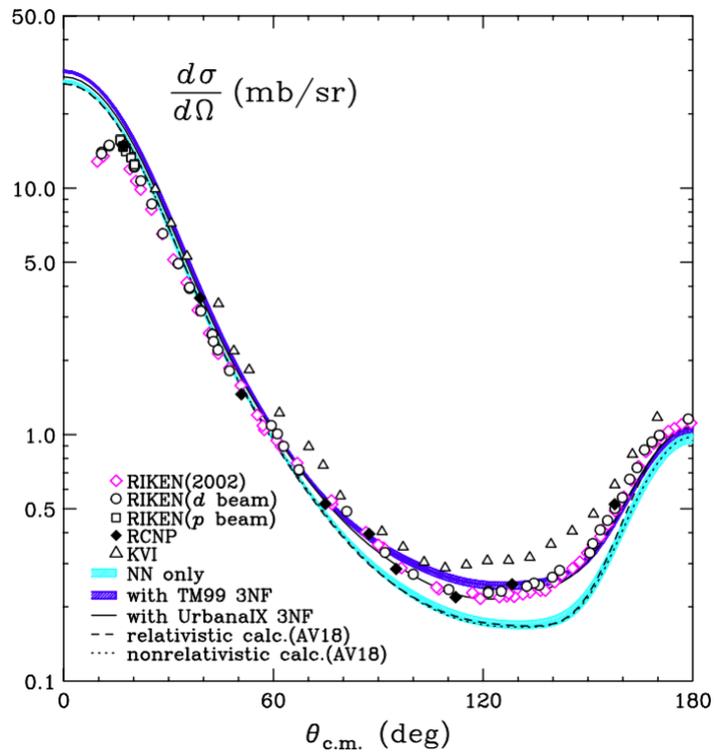


図 2.2: ビームエネルギー 135MeV/u による $p+d$ 弾性散乱の微分断面積 [10]。横軸は重心系での散乱角度、縦軸は微分断面積。 \diamond ・ \circ ・ \square は理化学研究所、 \blacklozenge は大阪大学核物理研究センター、 \triangle は KVI で行われた実験から得られた断面積である。色帯・破線は理論予測。[10] より引用し一部改変。

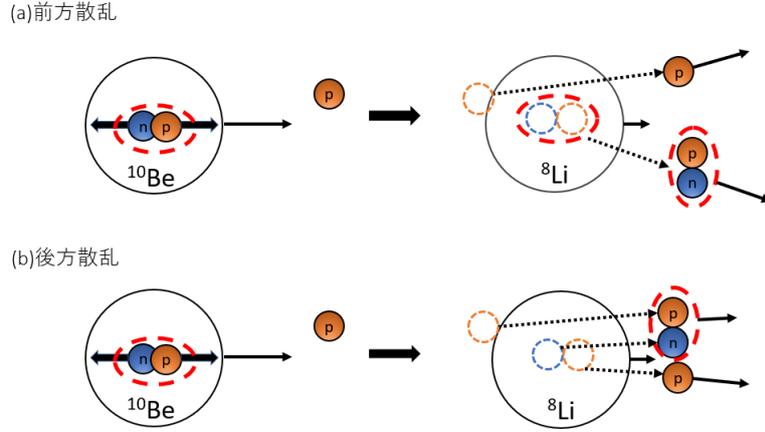


図 2.3: 逆運動学での $^{10}\text{Be}(p, pd)^8\text{Li}$ 反応の反応機構の模式図。(a) 前方散乱。(b) 後方散乱。どちらの場合も陽子と重陽子は前方に散乱する。

本実験では残留核 ^8Li の終状態を特定することで SRC ペアのスピ S とアイソスピン T の同定を行う。 ^{10}Be の基底状態は $J^\pi = 0^+$ であるため、反応に関与した SRC ペアが $S = 1, T = 0$ だった場合には ^8Li は $J^\pi = 1^+$ の第一励起状態となる。図 2.4 に ^8Li のエネルギー準位を示す [9]。 $J^\pi = 1^+$ の励起状態は第一励起状態と第三励起状態であり、第一励起状態は γ 崩壊を起こす。この時の γ 線のエネルギーは 0.9808 MeV であり、これを検出することで散乱した pn ペアが $S = 1, T = 0$ と特定することができる。第三励起状態が生成された場合には $^8\text{Li}^* \rightarrow ^7\text{Li} + n$ という反応を起こす。この場合には ^7Li と n の運動量 $\mathbf{p}(^7\text{Li})$, $\mathbf{p}(n)$ を同時測定することで不変質量法を用いて $^8\text{Li}^*$ の質量を次のように導出する。

$$M(^8\text{Li}^*) = \sqrt{(E(^7\text{Li}) + E(n))^2 - (\mathbf{p}(^7\text{Li}) + \mathbf{p}(n))^2} \quad (2.1)$$

これにより ^7Li と n との相対エネルギー

$$E_{rel} = M(^8\text{Li}^*) + M(^7\text{Li}) + M(n) \quad (2.2)$$

を導出する。 ^8Li の第三励起状態の励起エネルギー E_x は 3.210 MeV であり、中性子分離エネルギー S_n は 2.033 MeV であるので $E_{rel} = E_x - S_n = 1.177$ MeV となる。

我々は逆運動学の条件下で $^{10}\text{Be}(p, pd)^8\text{Li}$ 反応実験を行うため、前方散乱、後方散乱どちらの場合でも散乱粒子は実験室系では前方に散乱する。そのため前方散乱と後方散乱の事象を同時に検出することが可能である。前方散乱の測定には次節で説明する三重微分断面積の運動学的因子や行列要素に制限をかけ、モデル依存性を小さくするという目的がある。

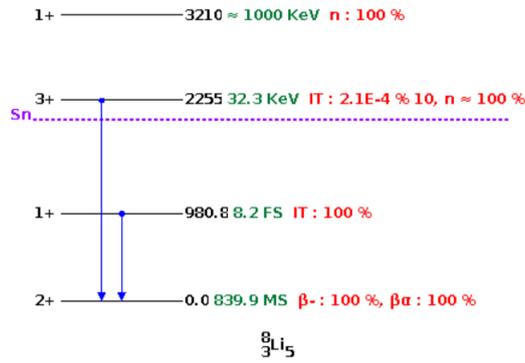


図 2.4: ${}^8\text{Li}$ の準位図 [9]。準位線右の黒字は励起エネルギー (keV) を表し、緑字は半減期 $T_{1/2}$ を表す。下向き青矢印はガンマ崩壊の遷移を表し、準位線左の数字は全スピンとパリティ J^π を表す。

2.2 三重微分断面積

SRC ペア観測のために実験データを理論計算と比較する必要がある。寺嶋氏らの実験では (p, pd) 反応の三重微分断面積 $d^3\sigma/d\Omega_p d\Omega_d dT_d$ を測定し、歪曲波インパルス近似 (Distorted Wave Impulse Approximation: DWIA) により解析を行っている。DWIA 計算では入射粒子および放出粒子の波動関数に歪曲波を用いて、入射粒子が核内の核子と 2 体散乱を 1 回のみ起こすとみなすインパルス近似を適用している [11]。DWIA 計算より (p, pd) 反応の三重微分断面積は

$$\frac{d^3\sigma}{d\Omega_p d\Omega_d dT_d} = S_d F_k \frac{d\sigma}{d\Omega_{p+d}} |T_L^\Lambda|^2 \quad (2.3)$$

と表される。 S_d は原子核内の重陽子に対する分光学的因子、 F_k は運動学的因子、 $d\sigma/d\Omega_{p+d}$ は $p+d$ 弾性散乱の微分断面積、 $|T_L^\Lambda|^2$ は遷移行列である。 L は重陽子の相対角運動量であり、 Λ はその射影である。原子核内に SRC ペアが存在した場合、 S_d が増大し図 2.5 の青線が模式的に示すように $\theta_{cm} > 90^\circ$ の後方散乱では三重微分断面積が増大する。

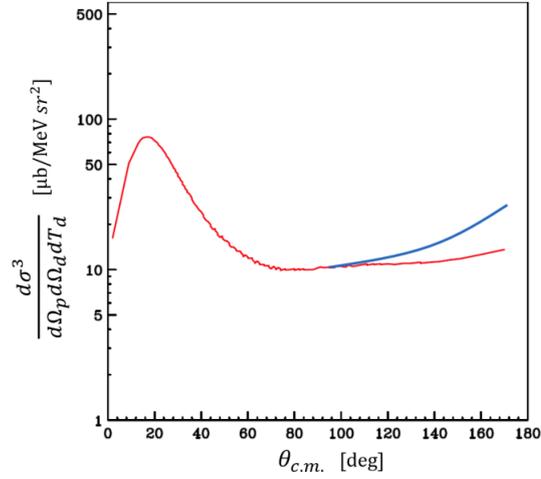


図 2.5: $p + d$ 散乱における三重微分断面積。 θ_{cm} は $p + d$ 散乱における重心系での散乱角度である。DWIA を用いて計算した断面積であり、赤線は SRC ペアがない場合、青線は SRC ペアがある場合の断面積を示している。

$^{10}\text{Be}(p, pd)^8\text{Li}$ 反応における放出粒子の自由度は $p, d, ^8\text{Li}$ についてそれぞれ運動エネルギー E 、ビーム軸となす角 θ の散乱角度および方位角 ϕ の散乱角度がある。 ϕ 方向には等方的に散乱するとすれば自由度は合計で 6 つとなる。さらにエネルギー保存則と運動量保存則より自由度は 3 つまで減る。したがって式 2.3 では断面積を E_d, θ_p, θ_d で除している。また、DWIA が精度よく成立するには順運動学において以下の条件が要求される。

- 残留核の反跳運動量 P_r が $|P_r| < 0.5 \text{ fm}^{-1}$
- $E_p > 30 \text{ MeV}, E_d > 60 \text{ MeV}$

1 つ目の条件は $p + d$ 反応が順弾性散乱になるための条件である。2 つ目の条件は、 p, d が大きいエネルギーを持つことで平均自由行程が十分長く、インパルス近似を適用できるための条件である。

2.3 $^{10}\text{Be}(p, pd)^8\text{Li}$ 反応における陽子・重陽子の散乱角度

実験セットアップを決定する際は放出粒子の散乱角度とエネルギーが重要になる。図 2.6 は本実験での陽子と重陽子の散乱角度 θ_p, θ_d とエネルギー T_p, T_d の相関を示している。 z 軸は三重微分断面積 $d^3\sigma/d\Omega_p d\Omega_d dT_d$ [$\mu\text{b}/\text{sr}^2 \text{ MeV}$] を表す。図中の角度は順運動学での陽子の散乱角度を表している。20, 40, 60° は前方散乱、150, 160, 170° は後方散乱に対応する。陽子と重陽子はどちらも前方散乱では後方散乱に比べ実験室系で大きな散乱角度を持つことがわかる。

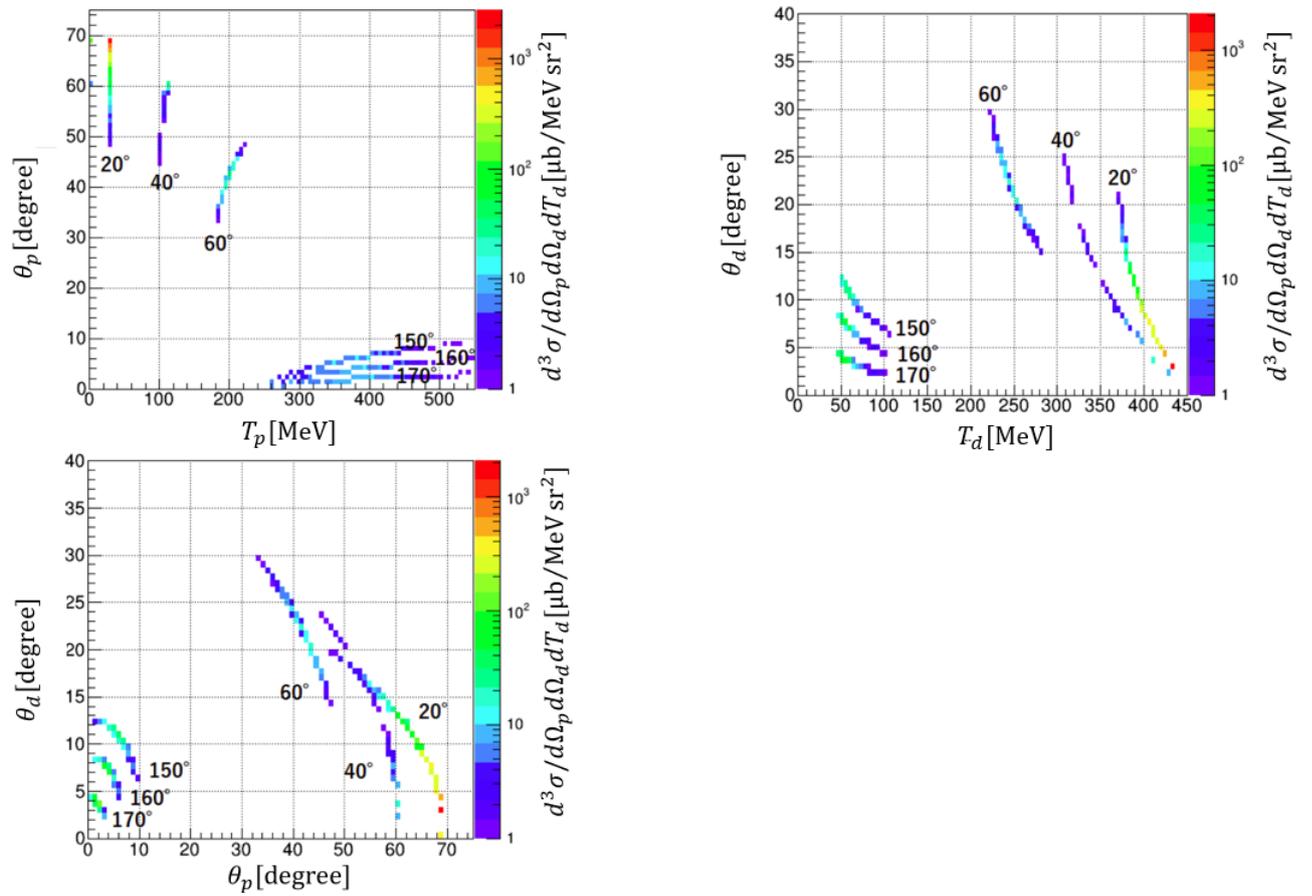


図 2.6: DWIA 計算によって求めた、逆運動学条件下での陽子と重陽子の散乱角度 θ_p, θ_d とエネルギー T_p, T_d の相関。z 軸は $d^3\sigma/d\Omega_p d\Omega_d dT_d$ [$\mu\text{b}/\text{sr}^2 \text{ MeV}$]。図中の角度は、順運動学における陽子の散乱角度を表し、20, 40, 60° は前方散乱、150, 160, 170° は後方散乱に対応する。

第3章

実験セットアップ

本実験は理化学研究所仁科加速器科学研究センターの RI ビームファクトリー (**R**adion **I**sotope **B**eam **F**actory : RIBF) で行われる。図 3.1 は RIBF の概観を示している。RIBF には AVF サイクロトロン、fRC、RRC、IRC、SRC のサイクロトロンがあり、本実験では AVF サイクロトロン、RRC、SRC を用いて一次ビームである ^{18}O を加速させる。加速された ^{18}O は RI ビーム生成分離装置 (BigRIPS) 内の一次標的に入射し、様々な種類の RI ビームが生成される。生成された RI ビームは BigRIPS 内で必要な核種のみ分離され、分離された RI ビームは SAMURAI エリアにて二次標的に入射し各種粒子が生成される。本章では BigRIPS での粒子の分離方法、SAMURAI および本実験で用いる標的と検出器について述べる。

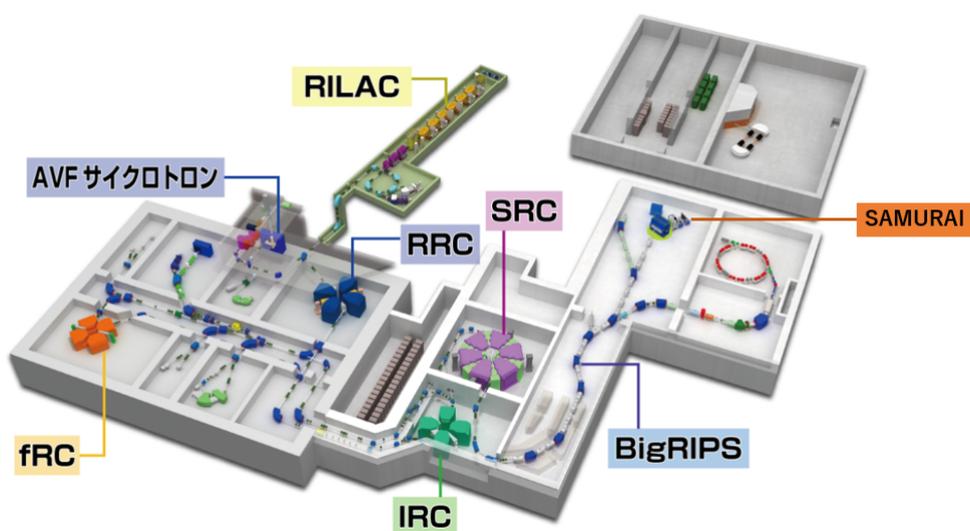


図 3.1: RIBF の概観

3.1 BigRIPS

二次ビームの生成・分離には RI ビーム生成分離装置 (**B**ig **R**Iken **P**rojectile-Fragment **S**eparator : BigRIPS) を用いる。図 3.2 は BigRIPS の概観を示している。本実験では一次ビームである 250 MeV/u の

^{18}O を F0 焦点面に設置された一次標的の ^9Be 標的に入射して、入射核破碎反応によって ^{10}Be を生成する。それ以外の不要な粒子は F1 焦点面に設置してある楔形ディグレーダーと双極・四重極磁石および F1, F2 焦点面のスリットを用いて分離する。F0 焦点面と F1 焦点面の間にある双極磁石 D1 によって、F0 焦点面で生成された荷電粒子は軌道を曲げられる。その軌道は磁気硬度 $B\rho$ で特徴づけられ、 $B\rho$ は以下のように書ける。

$$B\rho = \frac{P}{Ze} \sim \frac{Av}{Z} \propto \frac{A}{Z} \quad (3.1)$$

ここで P は粒子の運動量、 Z は原子番号、 e は電気素量、 A は質量数、 v は速度である。 B は双極磁石の磁束密度で ρ は磁場中の粒子の軌道半径であるためこれらは装置のセットアップによって決定される。入射核破碎反応の前後で粒子の速度はほぼ一定であるため磁気硬度は A/Z に比例すると考えられる。そのため磁場の強さと F1 焦点面のスリットによって特定の A/Z を選択し分離できる。

F1 焦点面を通過後は楔形ディグレーダーを通過する。ディグレーダー内では粒子はエネルギー損失を起こし、その大きさは Bethe-Bloch の式に従い近似的には Z^2/v^2 に比例する。この時点で A/Z と v は一定であるため Z のみによってエネルギー損失は異なる。そのためディグレーダーを通過後は粒子の Z によって $B\rho$ は異なる。その後は F0~F1 焦点面と同様に F1~F2 焦点面でも粒子の分離を行い特定の Z を持つ粒子を選択し二次ビームとする。選択された二次ビームは、F3~F7 焦点面で飛行時間 TOF (Time Of Flight)、磁気硬度 $B\rho$ 、エネルギー損失を測定し粒子識別を行う。TOF の測定には F3 焦点面と F7 焦点面に設置されたプラスチックシンチレータの時間情報を使用する。磁気硬度 $B\rho$ の測定には運動量分散焦点面 F5 に設置されたプラスチックシンチレータの位置情報を使用する。エネルギー損失の測定には F13 焦点面に設置されたイオンチェンバーを使用する。

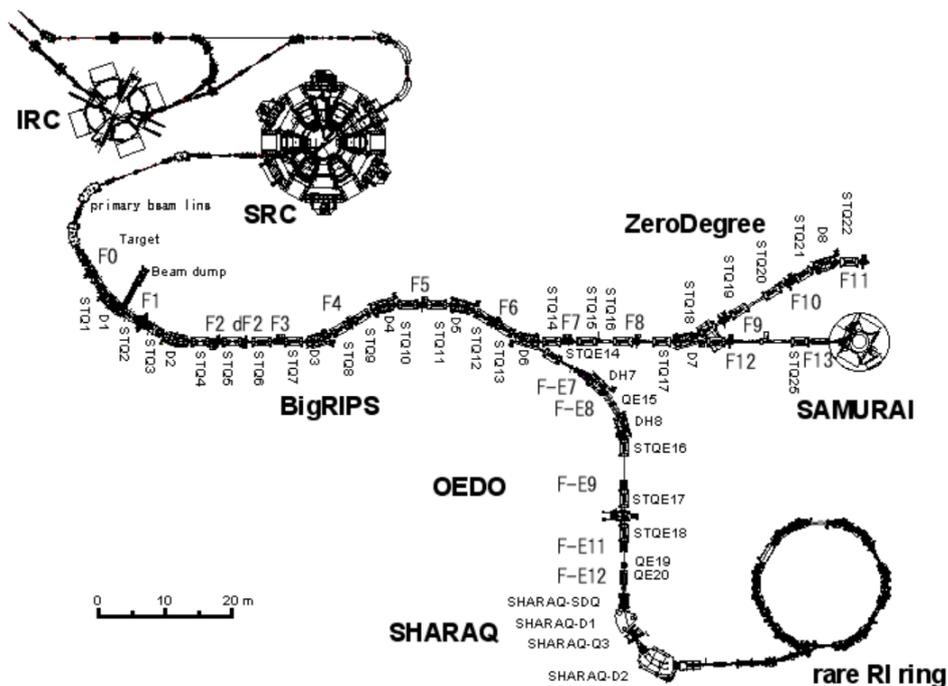


図 3.2: BigRIP の概観

3.2 SAMURAI

多粒子測定装置 SAMURAI(Superconducting Analyzer for Multi-particles from RadioIsotope beams) は超電導双極磁石、入射ビーム検出器、荷電粒子検出器、中性子検出器からなり、核反応により放出される多数の粒子を同時観測することができるスペクトロメータである。図 3.3 と図 3.4 に本実験のセットアップと $^{10}\text{Be}(p, pd)^8\text{Li}$ 反応での前方散乱、後方散乱の場合の粒子の飛跡を示している。液体水素標的の上流にはプラスチックシンチレータ (SBT1,2) とドリフトチェンバー (BDC1,2) を設置している。標的と SAMURAI 磁石の間にはプラスチックシンチレータ (FSD,BSD)、CsI(Na) アレイ (CATANA) およびドリフトチェンバー (FDC1) を設置しており SAMURAI 磁石内部にはプラスチックシンチレータ (NINJA) を設置している。SAMURAI 磁石の下流側にはドリフトチェンバー (PDC1,2, FDC2)、ホドスコープ (HODF24, HODP)、中性子検出器 (NEBULA) を設置している。前方散乱する陽子・重陽子は FSD と CATANA で検出される。後方散乱する陽子は PDC1,2 と HODP で検出され重陽子は BSD と NINJA によって検出される。標的と反応しなかった ^{10}Be や残留核 ^8Li などは FDC2 と HODF24 で検出される。また、 ^8Li の第三励起状態から放出される中性子は NEBULA で検出される。次節以降では各検出器と SAMURAI 磁石および標的について述べる。

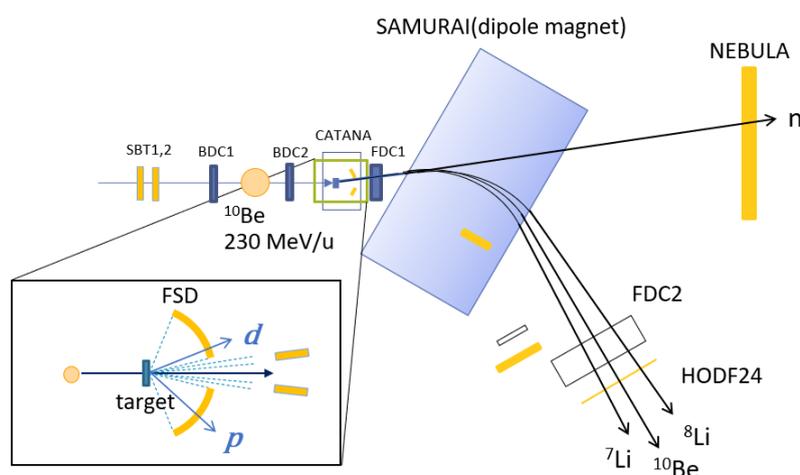


図 3.3: $^{10}\text{Be}(p, pd)^8\text{Li}$ 反応の実験セットアップ。粒子の飛跡は前方散乱イベントで放出された粒子を表す。標的の上流にはプラスチックシンチレータ (SBT1,2) とドリフトチェンバー (BDC1,2) を設置している。標的と SAMURAI 磁石の間にはプラスチックシンチレータ (FSD,BSD)、CsI(Na)(CATANA) およびドリフトチェンバー (FDC1) を設置しており SAMURAI 磁石内部にはプラスチックシンチレータ (NINJA) を設置している。SAMURAI 磁石の下流側にはドリフトチェンバー (PDC1,2, FDC2)、ホドスコープ (HODF24, HODP)、中性子検出器 (NEBULA) を設置している。前方散乱する陽子・重陽子は FSD と CATANA で検出される。標的と反応しなかった ^{10}Be や残留核 ^8Li などは FDC2 と HODF24 で検出される。また、 ^8Li の第三励起状態から放出される中性子は NEBULA で検出される。

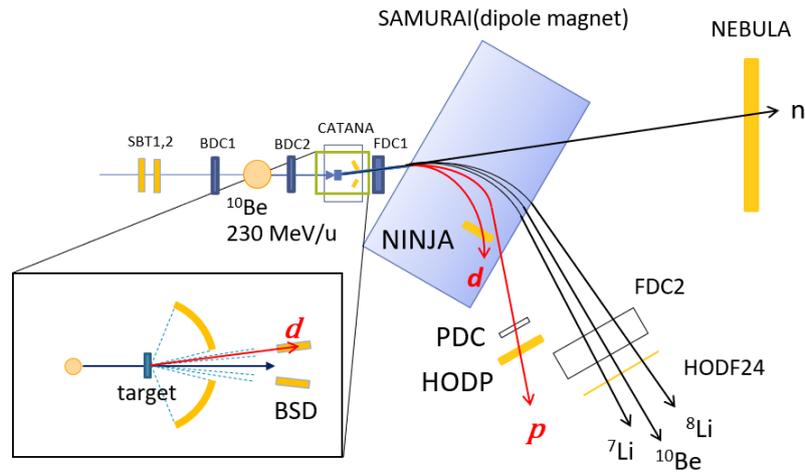


図 3.4: $^{10}\text{Be}(p, pd)^8\text{Li}$ 反応の実験セットアップ。粒子の飛跡は後方散乱イベントで放出された粒子を表す。後方散乱する陽子は SAMURAI 磁石で軌道が曲げられたのちに PDC1,2 と HODP で検出される。重陽子の一部は BSD によって検出され、一部は SAMURAI 磁石内に設置された NINJA によって検出される。標的と反応しなかった ^{10}Be や残留核 ^8Li などは FDC2 と HODF24 で検出される。また、 ^8Li の第三励起状態から放出される中性子は NEBULA で検出される。

3.3 標的前検出器系

3.3.1 SBT1,2

SBT1,2 は厚さ 1.0 mm のプラスチックシンチレータであり、SBT1 の直後に SBT2 を設置している。シンチレーション光はそれぞれ左右にライトガイドを介して光電子増倍管 (PhotoMultiplier Tube : PMT) で検出される。ビームの TOF の測定とトリガー生成の役割がある。

3.3.2 BDC1,2

BDC1,2 はドリフトチェンバーであり、本実験では液体水素標的に入射するビームの軌道を測定するために使用する。図 3.5 は BDC1,2 の正面図と側面図を示している。表 3.1 は BDC1,2 のワイヤーの仕様、表 3.2 は BDC1,2 の仕様を示している。

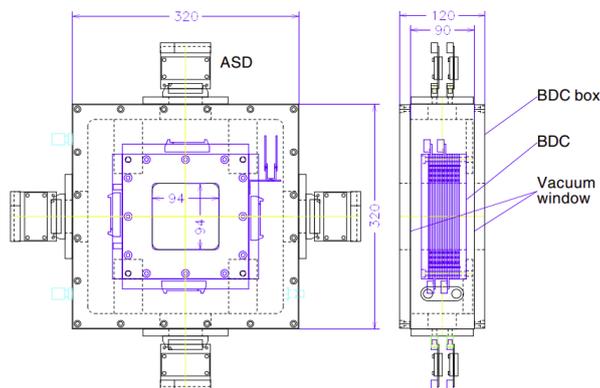


図 3.5: BDC1,2 の正面図 (左) と側面図 (右)[12]

表 3.1: BDC1,2 で使用しているワイヤー等の仕様 [13]

アノードワイヤー	16 $\mu\text{m}\phi$ Au-W/Re
ポテンシャルワイヤー	80 $\mu\text{m}\phi$ Au-Al
カソード	8 μm 厚 Al-カプトン
アノード-カソード間距離	2.5 mm

表 3.2: BDC1,2 の仕様 [13]

有感領域	80 mm \times 80 mm
アノードワイヤー	16 本/層 \times 8 層 = 128 本
HV	カソード、ポテンシャル

3.4 液体水素標的

$^{10}\text{Be}(p, pd)^8\text{Li}$ 反応の標的として本実験では液体水素標的を用いる。標的チェンバーの概観および断面図を図 3.6、バッファータンクの設計図を図 3.7、標的セルの設計図を図 3.8、標的セルの蓋の設計図を図 3.9 に示す。標的セルは本体部分と蓋で構成され、液体水素が充填されるセルの内径は $\phi=61$ mm、厚さは 15 mm である。蓋の内径は出入窓口と同じ大きさである。その直径は $\phi=46$ mm であり、10 μm のハーバー膜で塞ぐ。ハーバー膜の外周部分にリング状の 125 μm のカプトン膜を接着することでハーバー膜を接着する。このカプトン膜には、接着が弱いハーバー膜と蓋を押さえつける役割がある。液体水素標的の厚さは、膜の変形がない場合は 0.105 g/cm² であり、実際には膜が変形するためにこれよりも多少厚くなる。本実験で用いた液体水素標的システムでは冷却機構の直下に標的セルを配置せず、冷却機構の直下にあるバッファータンクから 240 mm 離して設置し、その間をパイプで接続している。こうすることで CATANA と液体水素供給システムの併用を可能にしている。

液体水素供給システムについて説明する。バッファータンクは冷却機構 (コールドヘッド) の直下に設置さ

れており、銅製のパイプで接続されている。コールドヘッドによって冷却されたバッファータンクで液体水素を受け止める。液体水素は図 3.6 のパイプ A を介してバッファータンクからセルへ移動する。はじめの時点ではパイプやセルの温度は液体水素の沸点より高いため液体水素が蒸発する。蒸発した水素は図 3.6 のパイプ B を介してバッファータンクへ戻り冷却されることで再び液体に戻る。液体水素が蒸発する際にパイプやセルから熱を吸収するため、パイプやセルの温度は下がる。この過程を繰り返すことでパイプとセルの温度は十分に下がり、最終的に標的セル内に液体水素が蒸発することなく充填される。バッファータンクと標的セルの熱伝導が重要であるため、セルやパイプはほぼすべて銅製である。バッファータンクの水素導入口のみ、リーク対策としてステンレス製である。

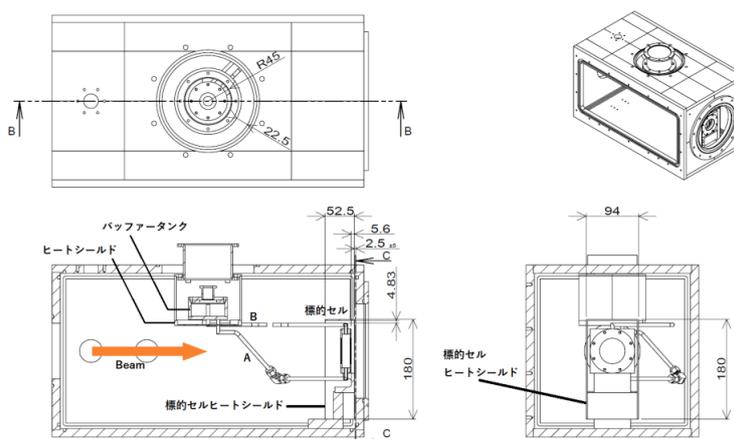


図 3.6: 液体水素標的チェンバー (バッファータンク、ヒートシールド、標的セル、真空チェンバー) の概観および断面図 [14]。上面図 (左上)、概観 (右上)、側面からの断面図 (左下)、下流側からの断面図 (右下) を表している。

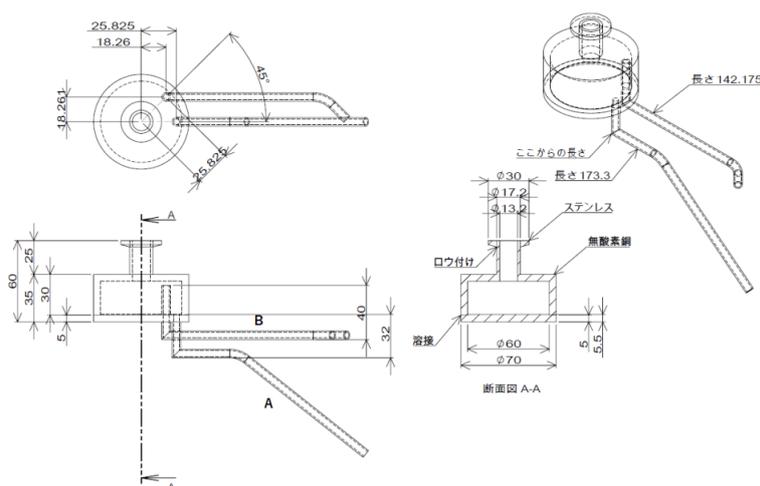


図 3.7: バッファータンクの設計図 [14]。パイプ A を介して液体水素はセルへと移動し、気化した水素はパイプ B を介してセルからバッファータンクへと移動する。全体は銅製であるが、水素導入口のみリークを防ぐためにステンレス製となっている。

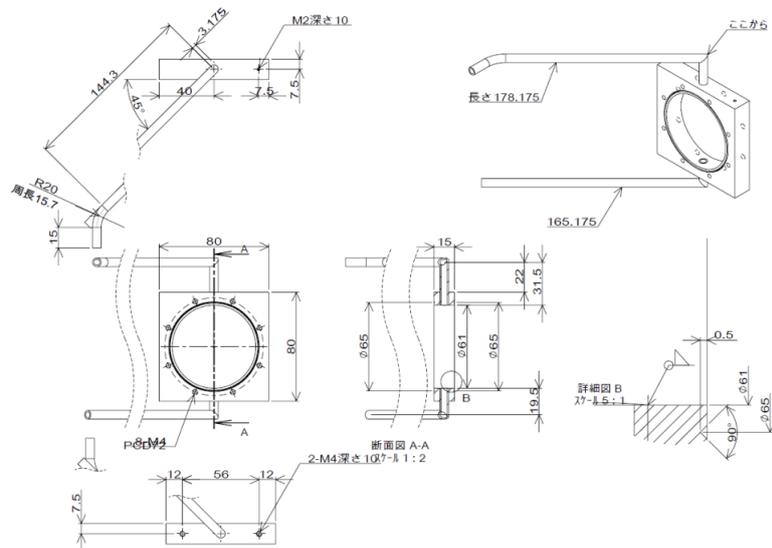


図 3.8: 標的セルの設計図 [14]。

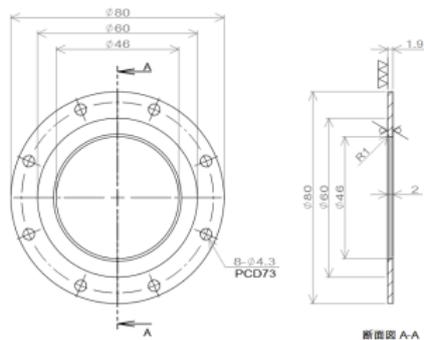


図 3.9: 標的セルの蓋の設計図 [14]。10 μm のハーバー膜で塞ぎ、ハーバー膜の外周部分にリング状の 125 μm のカプトン膜を接着することでハーバー膜を接着する。

3.5 前方散乱検出器系

本節では前方散乱する陽子・重陽子を測定する目的の検出器系について述べる。前方散乱のイベントは後方散乱のイベントに比べ、実験室系で大きな角度に散乱する。そのため、水素標的付近に FSD と CATANA を設置することでそれぞれ粒子のエネルギー損失 ΔE と全エネルギー E を測定し、粒子識別と運動量ベクトルの測定を行う。FSD と CATANA はセグメント化されており、信号のあるセグメントの位置より散乱角度を測定する。FSD と CATANA の側面図を図 3.10 に示す。

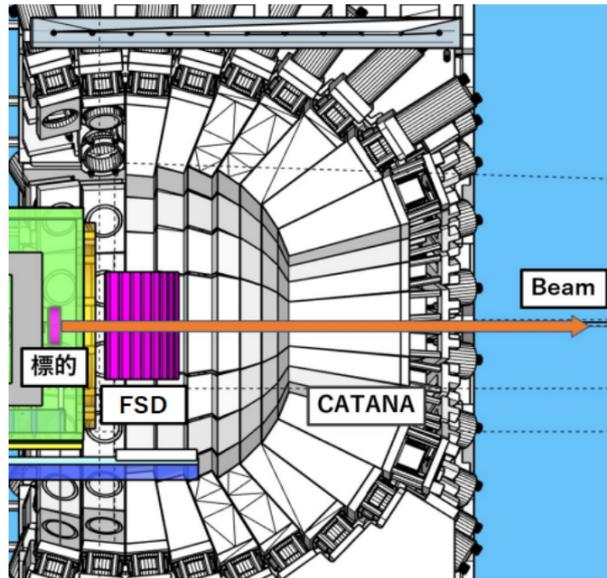


図 3.10: FSD と CATANA の側面図

3.5.1 前方散乱粒子検出器 (FSD)

前方散乱粒子検出器 (Forward Scattering particle Detector : FSD) は SRC ペア探索実験において、前方散乱する粒子の識別およびエネルギー損失 ΔE と散乱角度を測定するためのシンチレーション検出器である [14]。FSD の全体の構造は図 3.11 のようになっており、幅 12 mm × 高さ 224 mm × 厚さ 10 mm のプラスチックシンチレータを 2 つの層に互い違いに配置している。同じ層のシンチレータは 4 mm 間隔で離れている。図 3.12 に示すシンチレータ 1 本の概観のように、有感領域は幅 12 mm × 高さ 186 mm × 厚さ 10 mm となっており、これは検出器のフレームによる影響である。シンチレータの両端 10 mm の部分はライトガイドとして切削されており、端面の断面積は 6 mm × 6 mm になっている。端面には MPPC (Multi Pixel Photon Counter) がオプティカルセメントによって接着されている。MPPC は PMT と比較して小型かつ磁場の影響を受けないことから採用されている。MPPC からの信号の読み出し回路には NIM-EASIROC モジュールを使用している。NIM-EASIROC は ADC と TDC を備えた汎用の MPPC 読み出しモジュールで、64ch まで同時測定が可能である。

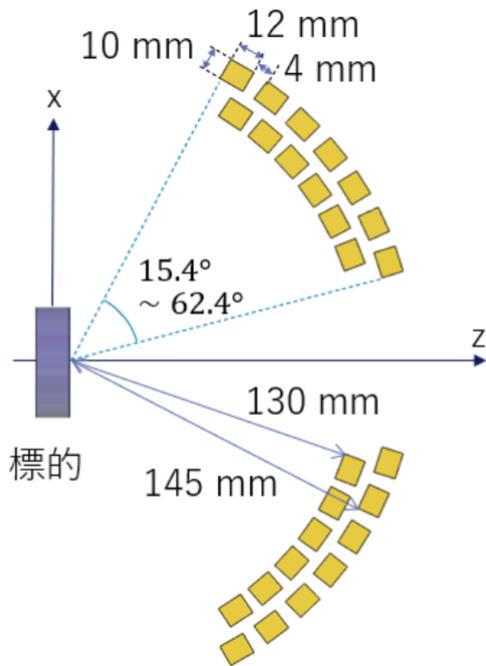


図 3.11: FSD を上面から見たときのシンチレータの配置。幅 12 mm × 高さ 224 mm × 厚さ 10 mm のプラスチックシンチレータを 2 つの層に互い違いに配置している。同じ層のシンチレータは 4 mm 間隔で離れている。第 1 層と第 2 層の標的からの距離はそれぞれ 130 mm と 145 mm。

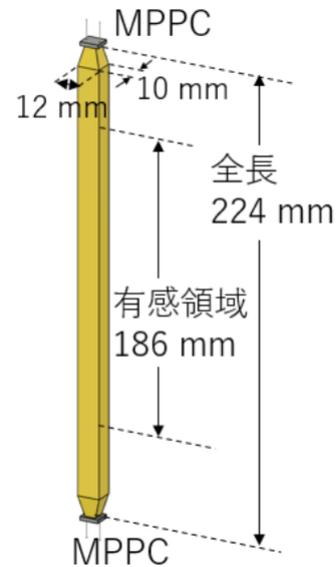


図 3.12: FSD で使用しているシンチレータ 1 本の概観。有感領域は幅 12 mm × 高さ 186 mm × 厚さ 10 mm となっており、シンチレータの両端は 10 mm のライトガイドとして切削されており、断面積は 6 mm × 6 mm になっている。

表 3.3: FSD の仕様と性能 [14]

シンチレータの種類	EJ-200
シンチレータの大きさ	幅 12 mm × 高さ 224 mm × 厚さ 10 mm
1 本当たりの有感領域	幅 12 mm × 高さ 186 mm × 厚さ 10 mm
MPPC の種類	浜松ホトニクス製 S13360-6050CS
読み出し回路	NIM-EASIROC
検出可能角度	$ \theta_x = 15.4^\circ \sim 62.4^\circ$ $ \theta_y = -35.3^\circ \sim 35.3^\circ$
エネルギー分解能	6~10% at 1 MeV
角度分解能	$\sigma_{\theta_x} = 0.5^\circ$

FSD は前方散乱した陽子・重陽子のエネルギー損失 $\Delta E_p, \Delta E_d$ と散乱角度 θ_x の測定を目的としている。FSD の性能評価より、1 MeV でのエネルギー分解能 σ_E は 6 ~ 10% が得られている。FSD はシンチレータが図 3.13 のように配置されているため、1 層目と 2 層目のコインシデンスを考えることで x 方向には $\sigma_x = 4/\sqrt{12} = 1.2$ mm の位置分解能、角度に換算すると $\sigma_{\theta_x} = 0.5^\circ$ の分解能を得ることができる。図 3.14 は FSD のヒットパターンを標的から近い順に番号付けしたもので、番号が奇数のものは 1 層のみ、偶数のも

のは2層のシンチレータに対応する。表 3.4 はそれぞれのヒットパターンにおける検出角度を示している。

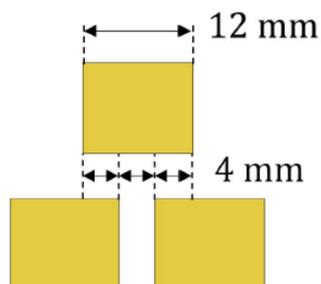


図 3.13: FSD の互い違いになっている構造を表した図。4 mm 間隔で異なる層と重なり合っているためコインシデンスを考えると x 方向には $\sigma_x = 4/\sqrt{12} = 1.2$ mm の位置分解能、角度に換算すると $\sigma_{\theta_x} = 0.5^\circ$ の分解能を得ることができる。

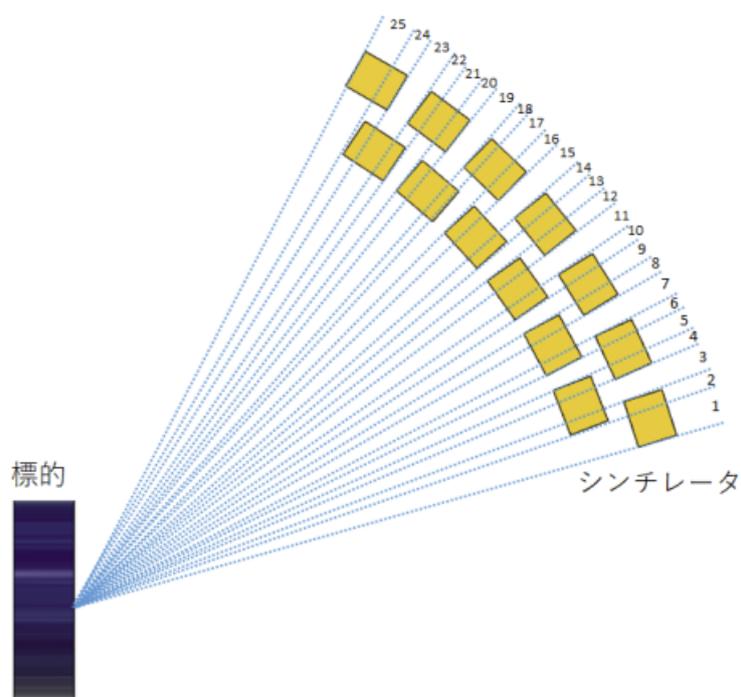


図 3.14: FSD のヒットパターンを標的から近い順に番号付けした図。番号が奇数のものは1層のみ、偶数のものは2層のシンチレータを通過する。

表 3.4: FSD におけるヒットパターンと検出角度

ヒットパターン	検出角度 θ [°]	ヒットパターン	検出角度 θ [°]
1	15.4~18.7	14	39.7~41.2
2	18.7~20.0	15	41.2~43.5
3	20.0~22.3	16	43.5~45.0
4	22.3~23.8	17	45.0~46.8
5	23.8~25.6	18	46.8~48.3
6	25.6~27.1	19	48.3~50.6
7	27.1~29.4	20	50.6~52.1
8	29.4~30.9	21	52.1~53.8
9	30.9~32.6	22	53.8~55.3
10	32.6~34.1	23	55.3~57.6
11	34.1~36.5	24	57.6~59.1
12	36.5~37.9	25	59.1~62.4
13	37.9~39.7		

3.5.2 CATANA

CATANA(CALorimeter for γ -ray Transition in Atomic Nuclei at high isospin Asymmetry) は図 3.15 に示すように、標的を覆う形で CsI(Na) 結晶が設置された構造を持つ γ 線検出器である [15]。図 3.16 のようにビーム下流側から結晶ごとにラベル付けされており、ビームラインとなす角 θ の角度分解能は 2.2° 、回転角 ϕ の角度分解能は 5.2° である。現在は L2 から L8 まで、合計 140 個の結晶から構成されており標的から $17.5^\circ \sim 71.0^\circ$ を覆っている。各層の検出角度、大きさ、測定可能エネルギーを表 3.5 に示す [16]。

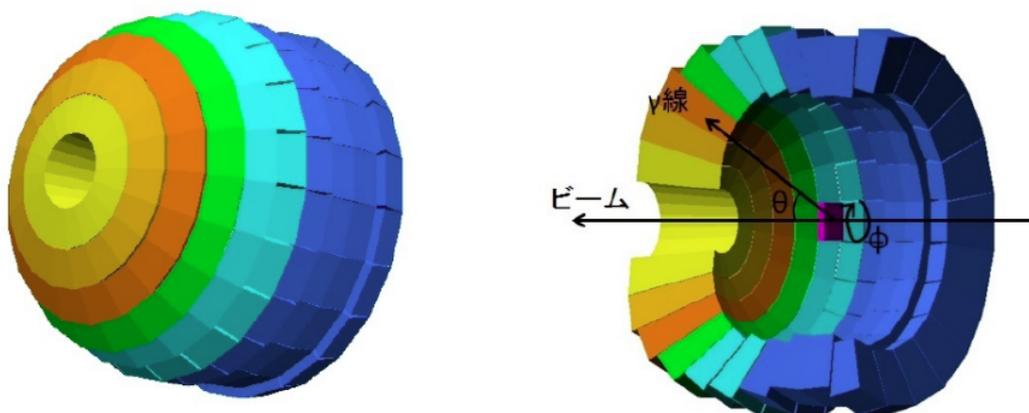


図 3.15: CATANA の全体図 (左: 全体図 右: 断面図)[15]。色の違いは異なる層を表している。

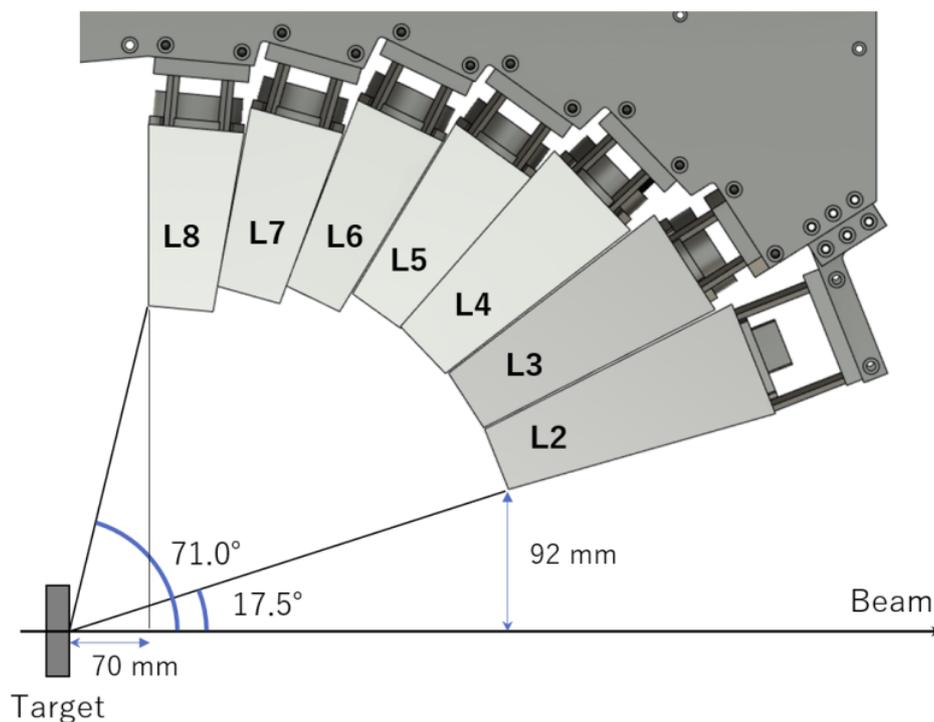


図 3.16: CATANA と標的の位置関係 [16]。L2~L8 の結晶がビームラインを軸として球状に配置されている。それぞれの結晶の検出角度は表 3.5 を参照。

表 3.5: CATANA の各層の検出可能角度、CsI(Na) 結晶の大きさ、測定可能な陽子の最大エネルギー [16]。

層番号	検出角度 θ [°]	CsI(Na) 結晶の 大きさ [mm]	測定可能な陽子の 最大エネルギー [MeV]
L2	17.5~25.0	150	251
L3	25.0~32.5	140	243
L4	32.5~40.5	125	225
L5	40.5~47.5	105	203
L6	47.5~54.5	105	203
L7	54.5~62.5	95	191
L8	62.5~71.0	95	191

3.6 SAMURAI 磁石

SAMURAI 磁石は標的の下流側に設置されている超伝導双極磁石であり、磁気硬度 $B\rho$ に応じて磁石内に入射する荷電粒子を分離する [12][17]。SAMURAI 磁石中心の最大磁束密度は 3.08 T であり、電極間距離は 880 mm である。最大中心磁気硬度は 7.05 Tm にまで及び、大きな偏向能力を持つ。また、SAMURAI 磁

石は実験に応じて回転することができる。本実験では中心磁束密度 2.3 T、回転角 30° で用いる。図 3.17 に SAMURAI 磁石の概観を示し、表 3.6 に SAMURAI 磁石の性能を示す。

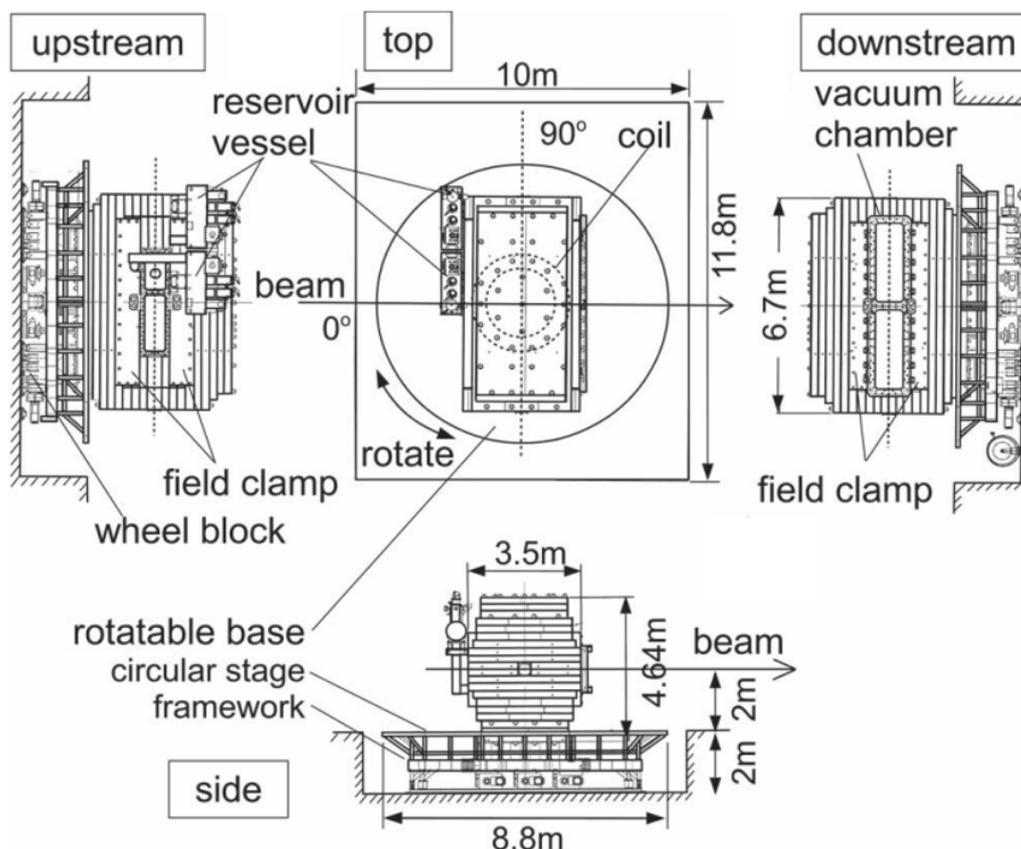


図 3.17: SAMURAI 磁石の概観 [17]。SAMURAI 磁石は回転台の上に設置されているため -5° から 90° まで回転することができる。図は 0° の状態。[17] から引用し一部改変。

表 3.6: SAMURAI 磁石の性能 [17]

最大電流	563A
最大中心磁束密度	3.05 T
最大中心磁気硬度	7.05 Tm

3.7 後方散乱検出器系

本節では後方散乱する陽子・重陽子を測定する目的の検出器系について述べる。後方散乱のイベントは前方散乱に比べて散乱角度が小さく、陽子は $\theta_p = 0 \sim 6^\circ$ 、重陽子は $\theta_p = 0 \sim 9^\circ$ に散乱する。この時、比較的大きな角度に散乱する重陽子は BSD によって検出される。小さな散乱角のイベントは SAMURAI 磁石内の NINJA と、磁石下流に設置してある PDC と HODP によって検出される。

3.7.1 後方散乱重陽子検出器 (BSD)

後方散乱重陽子検出器 (**B**ackward **S**cattering **d**euteron **D**etector : BSD) は SRC 探索実験において後方散乱する重陽子のエネルギー損失 ΔE , 全エネルギー E , 散乱角度を測定するためのシンチレーション検出器である。図 3.18 は BSD の概観を示しており、ビームラインを軸に左右対称に設置されている。BSD は ΔE と E を測定するためにプラスチックシンチレータの 2 層構造をとっており、1 層目で ΔE , 2 層目で E を測定する。これらを組み合わせることで粒子識別を行う。1 層目は幅 10 mm × 高さ 240 mm × 厚さ 6 mm のシンチレータを水平方向に 7 本並べており、シンチレータの上下には MPPC をオプティカルセメントで接着している。2 層目は幅 70 mm × 高さ 20 mm × 厚さ 60 mm のシンチレータを鉛直方向に 12 個重ねており、シンチレータの下流側には 3 個の MPPC をオプティカルセメントで接着している。各イベントの ΔE と E を測定するとともに、1 層目と 2 層目のコインシデンスを考慮することで各層のセグメントの位置から散乱角度の測定を行う。BSD はビームラインに対して 6.5° 傾いて設置されており、標的から 1 層目までの距離は 800 mm である。また、MPPC からの信号の読み出し回路には NIM-EASIROC モジュールを使用している。BSD の仕様と性能を表 3.7 に示す。

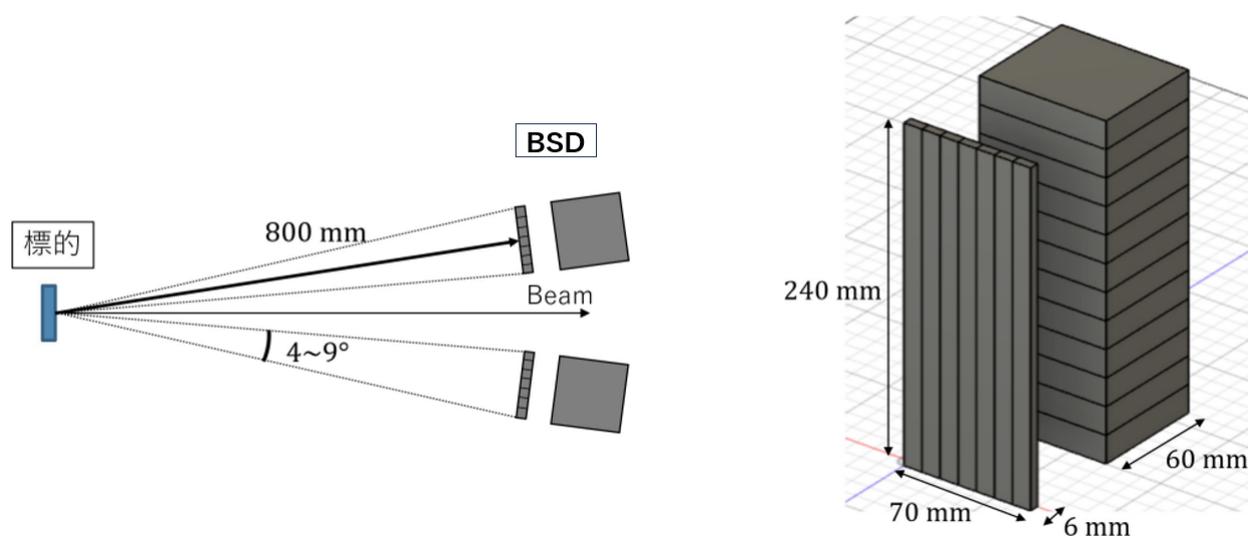


図 3.18: BSD の概観の概観。左は上面から、右は上流側から見た時の概観を表す。BSD は 2 層のプラスチックシンチレータで構成される。標的から BSD までの距離は 800 mm であり、 $4 \sim 9^\circ$ の範囲に放出された重陽子を検出する。1 層目では ΔE と水平方向の位置情報を、2 層目では E と鉛直方向の位置情報を測定する。

表 3.7: BSD の仕様と性能

シンチレータの種類	EJ-200
ΔE 検出器のシンチレータの大きさ	幅 10 mm × 高さ 240 mm × 厚さ 6 mm
ΔE 検出器の MPPC の種類	浜松ホトニクス製 S13360-3025CS
E 検出器のシンチレータの大きさ	幅 70 mm × 高さ 20 mm × 厚さ 60 mm
E 検出器の MPPC の種類	浜松ホトニクス製 S13360-6025CS
読み出し回路	NIM-EASIROC
検出可能角度	$ \theta_x = 4.0^\circ \sim 9.0^\circ$ $ \theta_y = 0^\circ \sim 35.3^\circ$
角度分解能	$\sigma_{\theta_x} = 0.2^\circ$ $\sigma_{\theta_y} = 0.4^\circ$

3.7.2 NINJA

NINJA(NI~~m~~ble detector array for Nucleons with JA~~c~~k-knife like trajectory) は SAMURAI 磁石内部に設置されたプラスチックシンチレータであり、本実験では BSD で測定できない角度に後方散乱した重陽子の検出を行う [18]。図 3.19 は SAMURAI 磁石内部から見た NINJA の概観を示している。NINJA は 2 層構造を取っており、1 層目は幅 60 mm × 高さ 720 mm × 厚さ 10 mm のシンチレータを水平方向に 18 本並べており、2 層目は幅 60 mm × 高さ 1100 mm × 厚さ 240 mm のシンチレータを鉛直方向に 12 本並べている。シンチレータの両端には MPPC が接着されており、NIM-EASIROC を用いて信号の読み出しを行う。

NINJA では重陽子の ΔE と、1 層目と 2 層目のコインシデンスを取ることで入射位置の測定を行う。表 3.8 に NINJA の仕様と性能を示す。



図 3.19: NINJA の概観 [18]。この写真では 1 層目だけ見えている。

表 3.8: NINJA の仕様と性能 [18, 19, 20]

シンチレータの種類	EJ-200
読み出し回路	NIM-EASIROC
水平方向の層のシンチレータの大きさ	幅 60 mm × 高さ 720 mm × 厚さ 10 mm
鉛直方向の層のシンチレータの大きさ	幅 60 mm × 高さ 1100 mm × 厚さ 240 mm
有効面積	縦 720 mm × 横 1100 mm
時間分解能 σ	460 ps

3.7.3 PDC1,2

PDC1,2(Proton Drift Chamber) は SAMURAI 磁石下流に位置する 2 層のドリフトチェンバーである [13]。本実験では後方散乱陽子の入射位置と角度を測定するために用いる。PDC1,2 ではカソード面とアノード面が交互に並べられており、その間隔は 8 mm である。複数の粒子を同時検出するためにカソード面では X(0°), U($+45^\circ$), V(-45°) の 3 つの異なる角度に、アノード面では U($+45^\circ$), V(-45°) の 2 つの異なる角度にワイヤーが貼られている。PDC1,2 の概観を図 3.20 に示し、PDC1,2 に使用しているワイヤーと PDC1,2 の仕様を表 3.9,3.10 に示す。

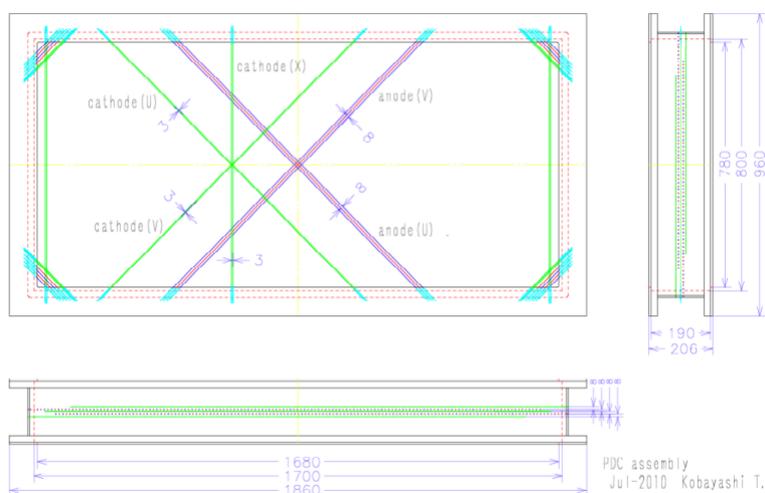


図 3.20: PDC1,2 の正面図 (左上)、側面図 (右)、上面図 (右上)[13]。PDC1,2 は 2 層とも同じ構造をしており、2 層を並べて使用する。

表 3.9: PDC1,2 で使用しているワイヤー等の仕様 [13]

アノードワイヤー	30 $\mu\text{m}\phi$ Au-W/Re
ポテンシャルワイヤー	80 $\mu\text{m}\phi$ Au-Al
カソードワイヤー	80 $\mu\text{m}\phi$ Au-Al
アノード面-カソード面間隔	8 mm

表 3.10: PDC1,2 の仕様 [13]

層の構造	カソード (U) - アノード (V) - カソード (X) - アノード (U) - カソード (V)
カソード面のワイヤーの角度	X(0°), U(+45°), V(-45°)
アノード面のワイヤーの角度	U(+45°), V(-45°)
有感領域	1700 mm × 800 mm
アノードワイヤー	16 mm 間隔, 106 本/層 × 2 層 = 212 本
ポテンシャルワイヤー	16 mm 間隔, 107 本/層 × 2 層 = 214 本
カソードワイヤー	3 mm 間隔, 544 本/層 × 3 層 = 1632 本
HV	アノード (+)、ポテンシャル (-)

3.7.4 HODP

HODP(HODscope for Proton) は、PDC1,2 の下流側に設置されている後方散乱陽子検出用のシンチレータホドスコープである [13]。幅 100 mm × 高さ 1200 mm × 厚さ 10 mm のプラスチックシンチレータ 16 本で構成され、シンチレータの両端に PMT が接着されている。本実験では、後方散乱陽子のエネルギー損失 ΔE と飛行時間 TOF を測定する。概観図を図 3.21 に、仕様を表 3.11 に示す。

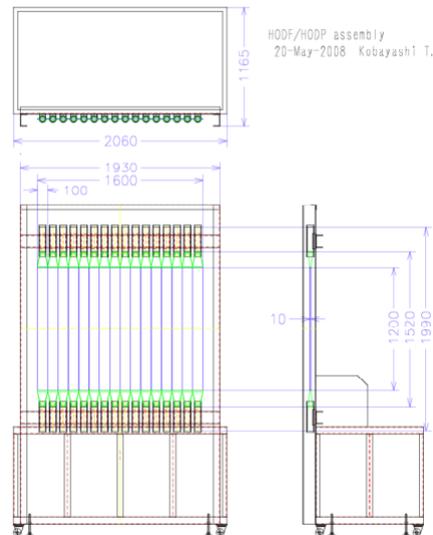


図 3.21: HODP の上面図 (上)、正面図 (左下)、側面図 (右)[13]

表 3.11: HODP の仕様 [13]

シンチレータの種類	BC-408
シンチレータ 1 本の大きさ	幅 100 mm × 高さ 1200 mm × 厚さ 10 mm
シンチレータの本数	16
PMT の種類	浜松ホトニクス製 H7195
有感領域	横 1600 mm × 縦 1200 mm

3.8 残留核測定器系

本節では $^{10}\text{Be}(p, pd)^8\text{Li}$ 反応で生成される ^8Li と、標的と反応しなかった ^{10}Be ビームに対する検出器系について述べる。 ^8Li の散乱角はほとんどが 1° 未満であり FDC1 を通って SAMURAI 磁石に入射し、下流側に設置された FDC2, HODF によって検出される。

3.8.1 FDC1

FDC1 (Forward Drift Chamber 1) は標的の下流側で SAMURAI 磁石の上流側に設置されるドリフトチェンバーである。本実験では $^{10}\text{Be}(p, pd)^8\text{Li}$ 反応で生成される ^8Li の通過位置を測定する。FDC1 は全 14 層で構成され、1 層当たり 32 本のワイヤーが 10 mm 間隔で貼られている。ワイヤーは $x(0^\circ)$, $u(+30^\circ)$, $v(-30^\circ)$ の 3 つの異なる角度で張られており、 $x(u, v)$ 面と $x'(u', v')$ 面はワイヤーの位置を 5 mm ずらしている。図 3.22 は概観図、表 3.12 は FDC1 のワイヤー等の仕様、表 3.13 は FDC1 の仕様を示している。

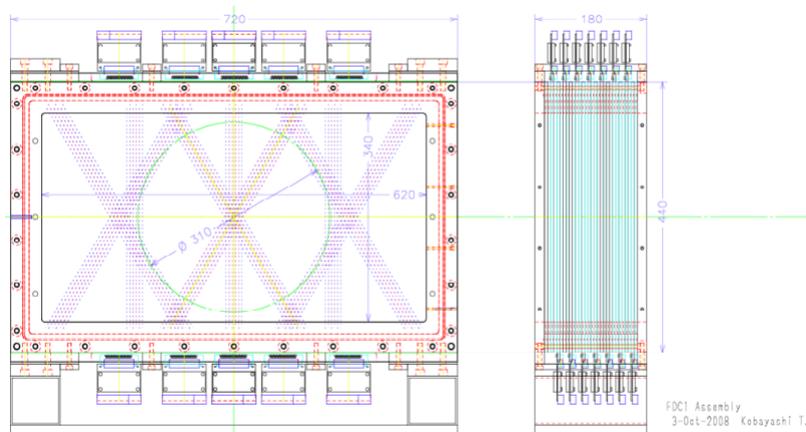


図 3.22: FDC1 の正面図 (左) と側面図 (右)[13]

表 3.12: FDC1 で使用しているワイヤー等の仕様 [13]

アノードワイヤー	20 $\mu\text{m}\phi$ Au-W/Re
ポテンシャルワイヤー	80 $\mu\text{m}\phi$ Au-Al
カソード面	8 μm 厚 Al-カプトン
アノード-ポテンシャル間 (ドリフト) 距離	5 mm
アノード-カソード間距離	5 mm

表 3.13: FDC1 の仕様 [13]

層の構造	xx' uu' vv' xx' uu' vv' xx'
ワイヤーの角度	X(0°), U(+30°), V(-30°)
有感領域	315 mm ϕ
アノードワイヤー	32 本/層 \times 14 層 = 448 本

3.8.2 FDC2

FDC2 は SANURAI 磁石の下流側に設置されているドリフトチェンバーで、荷電粒子の磁気硬度の測定を目的としている。FDC2 は全 14 層で構成され、1 層当たり 112 本のワイヤーが 20 mm 間隔で貼られている。ワイヤーは x(0°), u(+30°), v(-30°) の 3 つの異なる角度で張られており、x(u,v) 面と x'(u',v') 面はワイヤーの位置を 5 mm ずらしている。図 3.23 は概観図、表 3.14 は FDC2 のワイヤー等の仕様、表 3.15 は FDC2 の仕様を示している。

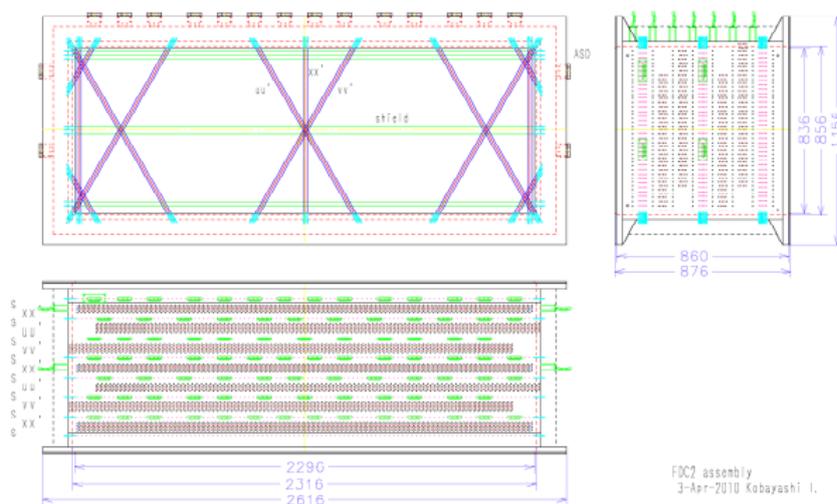


図 3.23: FDC2 の正面図 (左上) と側面図 (右上) と上面図 (左下)[13]

表 3.14: FDC2 で使用しているワイヤー等の仕様 [13]

アノードワイヤー	40 $\mu\text{m}\phi$ Au-W/Re
フィールド/シールドワイヤー	80 $\mu\text{m}\phi$ Au-Al
セル構造	六角形
ドリフト距離	10 mm

表 3.15: FDC2 の仕様 [12][13]

層の構造	s-xx'-s-uu'-s-vv'-s-xx'-s-uu'-s-vv'-s-xx'
ワイヤーの角度	X(0°), U(+30°), S(+90°)
有感領域	幅 0.8 m × 高さ 2.2 m × 厚さ 0.8 m
アノードワイヤー	112 本/層 × 14 層 = 1568 本

3.8.3 HODF24

HODF24(**HOD**scope for **F**ragment) は FDC2 の下流側に設置されているホドスコープであり、荷電粒子のエネルギー損失 ΔE と飛行時間 TOF の測定を目的としている。HODP と同様にプラスチックシンチレータを 24 本並べた構造をしており、HODP より大きなアクセプタンスを持つ。HODF24 の仕様を表 3.16 に示す。

表 3.16: HODF24 の仕様 [13]

シンチレータの種類	BC-408
シンチレータ 1 本の大きさ	幅 100 mm × 高さ 1200 mm × 厚さ 10 mm
シンチレータの本数	24
PMT の種類	浜松ホトニクス製 H7195
有感領域	横 2400 mm × 縦 1200 mm

3.8.4 NEBULA

NEBULA(**NE**utron Detection System for **B**reakup of **U**nstable **N**uclei with **L**arge **A**ceptance) は SAMURAI 磁石の下流側に設置されている中性子検出器である。本実験では ^8Li の崩壊で放出される中性子の検出

を目的としている。中性子検出器 (NEUT) と荷電粒子検出器 (VETO) により構成されており、約 100~300 MeV の中性子を測定するために用いる。それぞれプラスチックシンチレータとその両端に接着されている PMT から構成されている。図 3.24 に NEBULA の概観図、表 3.17 に NEBULA の仕様を示す。

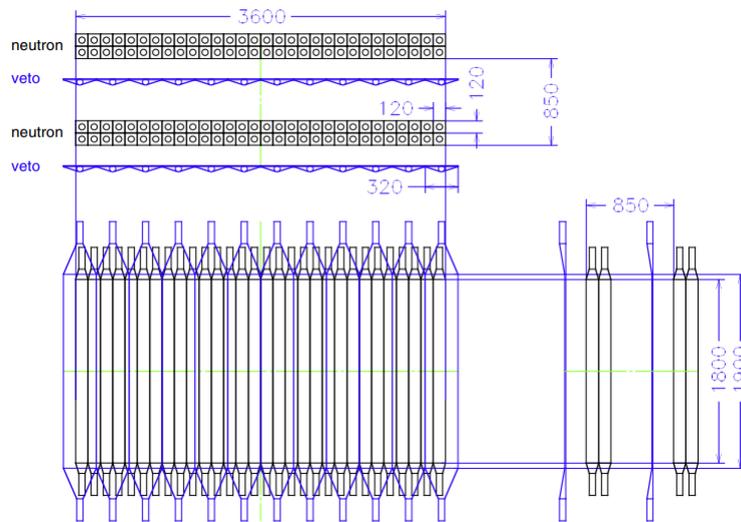


図 3.24: NEBULA の正面図 (左下) と側面図 (右) と上面図 (上)[12]

表 3.17: NEBULA の仕様 [21]

シンチレータの種類	BC-408
シンチレータ 1 本の大きさ	: NEUT 幅 12 cm × 高さ 180 cm × 厚さ 12 cm : VETO 幅 32 cm × 高さ 190 cm × 厚さ 1 cm
PMT の種類	浜松ホトニクス製 R7724ASSY
有感領域	横 3.2 m × 縦 1.8 m 30NEUT/層 × 4層 = 120 本 12NEUT/層 × 2層 = 24 本

第 4 章

後方散乱重陽子検出器 BSD

この章では理化学研究所の実験で用いる予定の後方散乱重陽子検出器 BSD (Backward Scattering deuteron Detector) の原理と構成要素について述べる。BSD はプラスチックシンチレータと MPPC で構成される。まずプラスチックシンチレータと MPPC の原理について述べ、また MPPC に関連してフォトダイオード、アバランシェフォトダイオードの原理についても述べる。その後 BSD の詳細について説明する。

4.1 シンチレーション検出器の原理

4.1.1 プラスチックシンチレータ

プラスチックシンチレータは単一分子のエネルギー準位間の遷移によって発光する。荷電粒子がシンチレータ内部を通過した際に、荷電粒子の運動エネルギーの一部を使うことでシンチレータを構成する分子の電子が励起させる。励起状態の電子が基底状態に遷移する際に、励起状態にあった電子の数に応じてシンチレーション光が発せられる。シンチレーション光の強度は減衰時間を τ 、励起後時刻 t とすると

$$I = I_0 e^{-t/\tau} \quad (4.1)$$

となる。プラスチックシンチレータの場合は τ が小さく即発成分は非常に速いことが特徴である。

単位飛程長あたりに放出される発光量 dL/dx と荷電粒子のエネルギー損失 dE/dx の間の関係は、荷電粒子のエネルギーを測定するにあたって重要となる。これらの関係は高速電子で励起されるようなクエンチングがない場合は、シンチレーション効率 S を用いて

$$\frac{dL}{dx} = S \frac{dE}{dx} \quad (4.2)$$

となる。すなわち単位エネルギー損失当たりの光出力の増加分は一定となるため光出力は

$$L = SE \quad (4.3)$$

となり、入射粒子のエネルギーに比例するため発光量から粒子のエネルギーを評価することができる。注意すべき点として、重イオンがシンチレータに入射した場合にはクエンチングがある。BSD に用いているプラスチックシンチレータの場合の、エネルギーと発光量の関係を図 4.1 に示す。

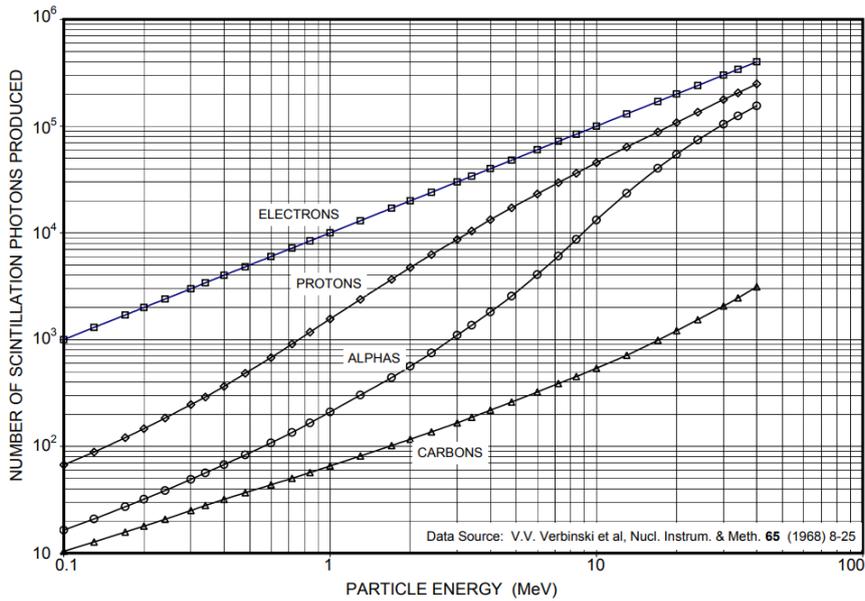


図 4.1: プラスチックシンチレータ EJ-200 における荷電粒子のエネルギーと発生する光子数の関係 [22]

4.1.2 フォトダイオード (PD)

フォトダイオード (**PhotoDiode** : PD) は光半導体素子の PN 接合部に光を照射すると電流や電圧が発生する受光素子である。N 型半導体の電子は P 型半導体に移動し正孔と結合し電荷を打ち消しあい空乏層と呼ばれる領域ができる。N 型半導体は正に、P 型半導体は負に帯電するため空乏層には内部電圧が生じる。PD に光が照射され、そのエネルギーがバンドギャップエネルギーより大きい場合には価電子帯の電子は伝導体へと励起され、元の価電子帯に正孔を残す。PD 内の電場によって電子は N 層へ、正孔は P 層へと加速され、その結果として N 層は負に、P 層は正に帯電する。帯電した N 層と P 層に外部回路を接続することで電流が発生する。入射した光により発生した電子正孔対の数と電流は比例するため、電流を測定することで入射光子数を評価することができる。

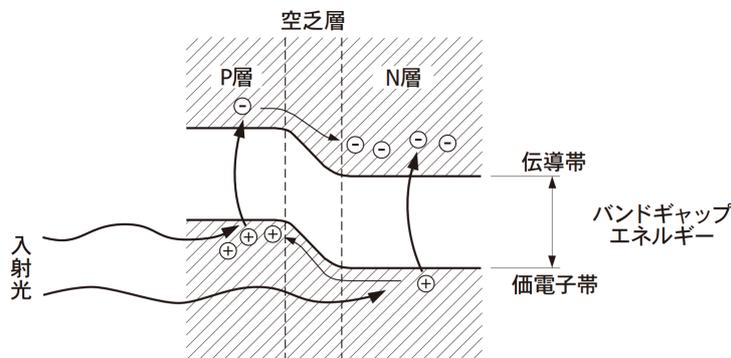


図 4.2: フォトダイオードの PN 接合の状態 [23]

4.1.3 アバランシェフォトダイオード (APD)

アバランシェフォトダイオード (Avalanche PhotoDiode : APD) は、逆電圧を印加することにより光電流が増倍される高速・高感度の PD である。図 4.3 は APD の構造を表している。電場強度が大きい層をアバランシェ層という。PN 接合に逆電圧を印加すると、空乏層内部で発生した電子・正孔対のうち、電子は N^+ 側に、正孔は P^- 側にそれぞれ電場によって移動する。アバランシェ層は特に強い電場がかかっているためキャリアの速度は特に大きくなる。結晶格子との散乱頻度が増し、衝突を繰り返すことで一定の速度に飽和する。しかし結晶格子との衝突を免れたキャリアは非常に大きなエネルギーを持つようになり、このキャリアが結晶格子と衝突すると新たな電子・正孔対を発生させる現象が起こる。この現象をイオン化と呼び、イオン化によって発生した電子・正孔対が新たな電子・正孔対を発生させるというように、イオン化は連鎖的に発生する。この現象をアバランシェ増倍といい、APD はこの現象を利用してキャリアを増倍している。

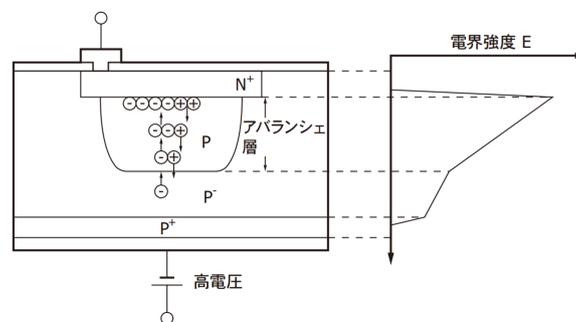


図 4.3: アバランシェ増倍の模式図 (近赤外タイプ)[24]

4.1.4 MPPC

MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) はガイガーモード APD をマルチピクセル化した光子カウンティングデバイスである。ガイガーモードとは、APD に印加する逆電圧を降伏電圧以上にして動作させる状態のことをいい、入射光子数に関係なく光入射によって素子固有の飽和出力が発生する。これをガイガー放電という。一度ガイガー放電が始まると素子内部の電場が保たれる間は放電が継続される。MPPC ではガイガー放電を止めるために APD にクエンチング抵抗を直列に接続している (図 4.4)。ガイガー放電による出力電流がクエンチング抵抗を流れる際に電圧降下を起こし、直列に接続された APD の動作電圧が下がりガイガー放電が止まる。

MPPC はガイガーモード APD をマルチピクセル化したものである。各ピクセルに光子が入射した際の出力は出力パルスは 1 つであり、入射光子数に依存しない。そのため同一のピクセルに複数の光子が同時に入射した場合でも出力は 1 つである。検出する光子数に対して十分なピクセル数がない場合には複数の光子が同じピクセルに入射することで数え落としが発生する可能性がある。MPPC に入射する光子数を正確にカウントするために、光子数に対して十分なピクセル数が必要となる。

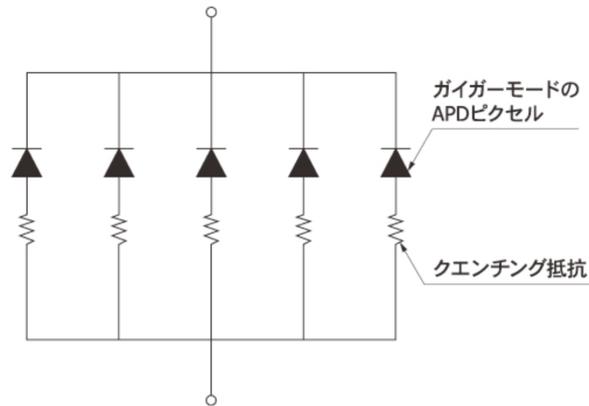


図 4.4: MPPC の回路図 [25]

4.2 BSD の構成要素

BSD は 2 層のプラスチックシンチレータから構成され、シンチレーション光の検出には MPPC を用いている。また、MPPC からの出力信号の読み出しには NIM-EASIROC を用いている。この節ではこれらの構成要素について述べる。

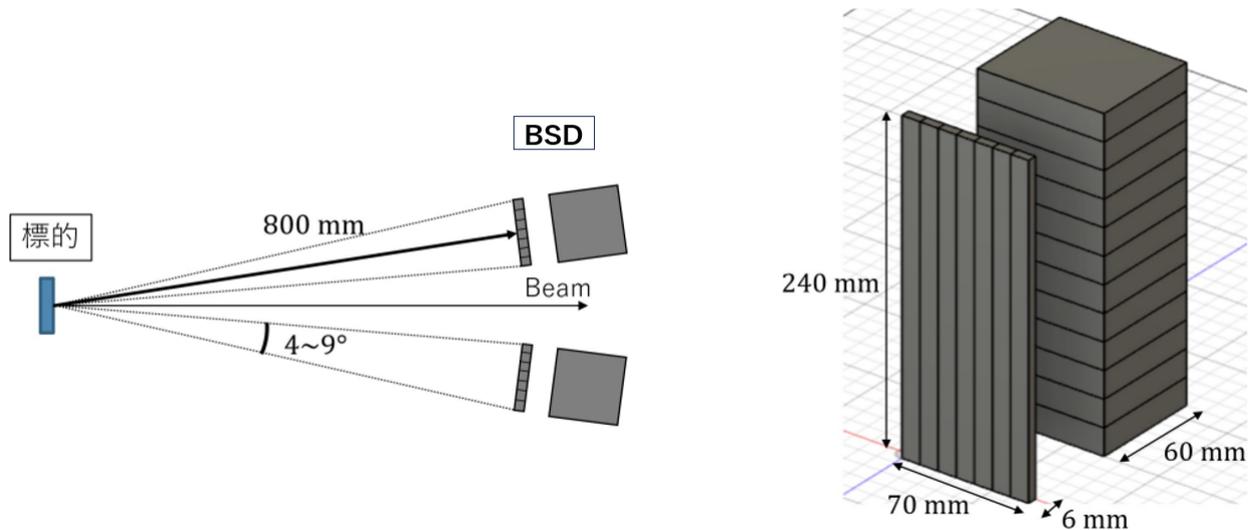


図 4.5: BSD の概観の概観。左は上面から、右は上流側から見た時の概観を表す。BSD は 2 層のプラスチックシンチレータで構成される。標的から BSD までの距離は 800 mm であり、 $4 \sim 9^\circ$ の範囲に放出された粒子を検出する。1 層目では ΔE と x 方向の位置情報を、2 層目では E と y 方向の位置情報を測定する。

4.2.1 プラスチックシンチレータ

BSDのシンチレータは ΔE 、 E のどちらもELJEN TECHNOLOGY社製のEJ-200を使用している。 ΔE のシンチレータは幅10 mm × 高さ240 mm × 厚さ6 mmであり、シンチレータの両端にはMPPCがオプティカルセメントで接着してある(図4.6)。 E のシンチレータは幅70 mm × 高さ20 mm × 厚さ60 mmであり、シンチレータの下流側には3つのMPPCがオプティカルセメントで接着してある(図4.7)。遮光にはアルミナイズドマイラーと遮光シートを用いている。表4.1にEJ-200の特性を示す。

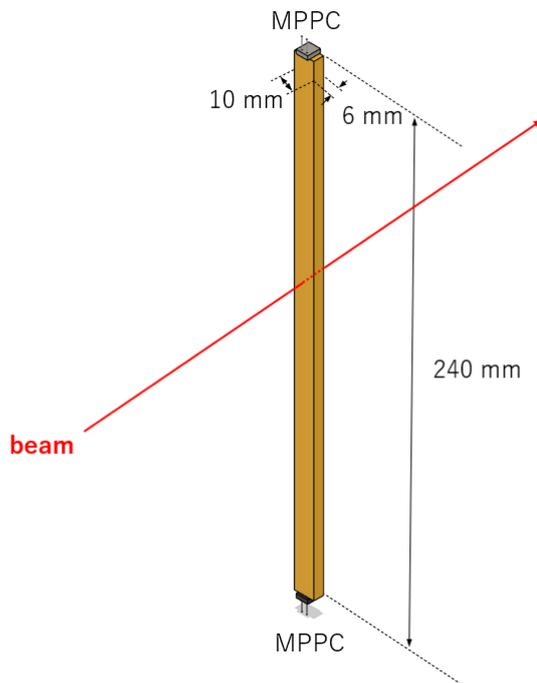


図 4.6: BSD の ΔE 検出器に使用しているシンチレータの概観。この図においてビームは手前から奥に向かって入射する。シンチレータは幅 10 mm × 高さ 240 mm × 厚さ 6 mm であり、シンチレータの両端には MPPC が接着してある。

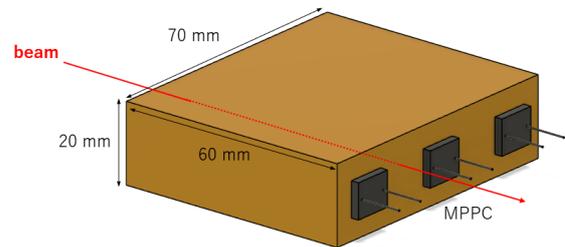


図 4.7: BSD の E 検出器に使用しているシンチレータの概観。この図においてビームは奥から手前に向かって入射する。シンチレータは幅 70 mm × 高さ 20 mm × 厚さ 60 mm であり、シンチレータの下流側には 3 つの MPPC が接着してある。

表 4.1: EJ-200 の特性 [22]

最高放出波長	425 nm
発光効率	10000 フォトン/1 MeV e^-
減衰長	380 cm
密度	1.023 g/cm ³
屈折率	1.58

4.2.2 MPPC

ΔE 検出器と E 検出器の MPPC にはそれぞれ浜松ホトニクス製の S13360-3025CS(図 4.8) と S13360-6025CS(図 4.9) を用いている。それぞれの主な性能を表 4.2 と表 4.3 に、検出効率を図 4.10 に示す。

BSD で重陽子を測定する際の最大エネルギー損失は ΔE 検出器では約 20 MeV、 E 検出器では約 100 MeV である。 ΔE 検出器に関して、検出する最大光子数は約 2×10^5 である。 ΔE 検出器の両端の MPPC に光子が 2 等分されて入射するとする。MPPC が接着してある面の断面積は 6 mm \times 10 mm であり、MPPC の受光面積は図 4.11 3 mm \times 3 mm である。また、開口率が 47 % であることと MPPC の図 4.10 より検出効率が約 25 % であることを考慮すると 1 つの MPPC で検出する光子数は $2 \times 10^5 \times \frac{1}{2} \times \frac{3 \times 3}{10 \times 6} \times 0.47 \times 0.25 \sim 1800$ である。 ΔE 検出器に使用している MPPC のピクセル数は 14400 であることより、十分なピクセル数であるといえる。 E 検出器に関して同様に計算する。検出する最大光子数は約 1×10^6 である。MPPC が接着してあるシンチレータの面の断面積は 20 mm \times 70 mm であり、MPPC の受光面積は図 4.12 のように 6 mm \times 6 mm である。 ΔE 検出器の場合と同様に開口率が 47 % であることと MPPC の図 4.10 より検出効率が約 25 % であることを考慮すると 1 つの MPPC で検出する光子数は $1 \times 10^6 \times \frac{6 \times 6}{20 \times 70} \times 0.47 \times 0.25 \sim 3000$ である。 E 検出器に使用している MPPC のピクセル数は 57600 であることより、十分なピクセル数であるといえる。

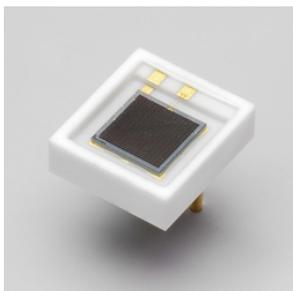


図 4.8: 浜松ホトニクス製 S13360-3025CS[26]



図 4.9: 浜松ホトニクス製 S13360-6025CS[27]

表 4.2: S13360-3025CS の性能 [28]

有効受光面サイズ	3.0 mm \times 3.0 mm
ピクセルピッチ	25 μ m
ピクセル数	14400
開口率	47 %
感度波長範囲	270 ~ 900 nm
最大感度波長	450 nm

表 4.3: S13360-6025CS の性能 [28]

有効受光面サイズ	6.0 mm \times 6.0 mm
ピクセルピッチ	25 μ m
ピクセル数	57600
開口率	47 %
感度波長範囲	270 ~ 900 nm
最大感度波長	450 nm

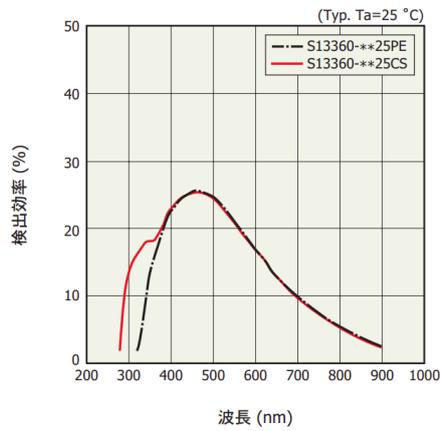


図 4.10: S13360-3025CS と S13360-6025CS の検出効率 [28]。BSD で使用している S13360-3025CS と S13360-6025CS は赤線である。

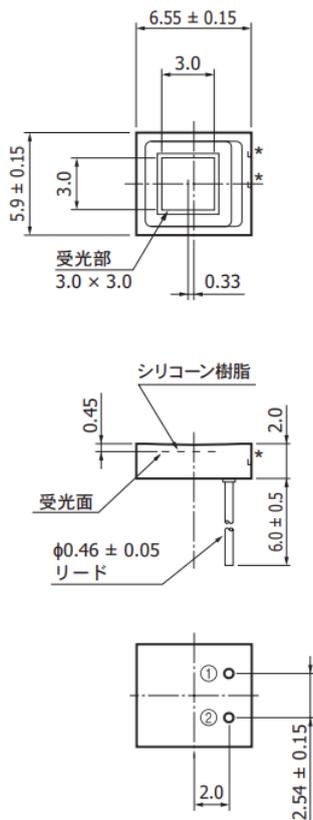


図 4.11: 浜松ホトニクス製 S13360-3025CS の外形寸法図 [26]

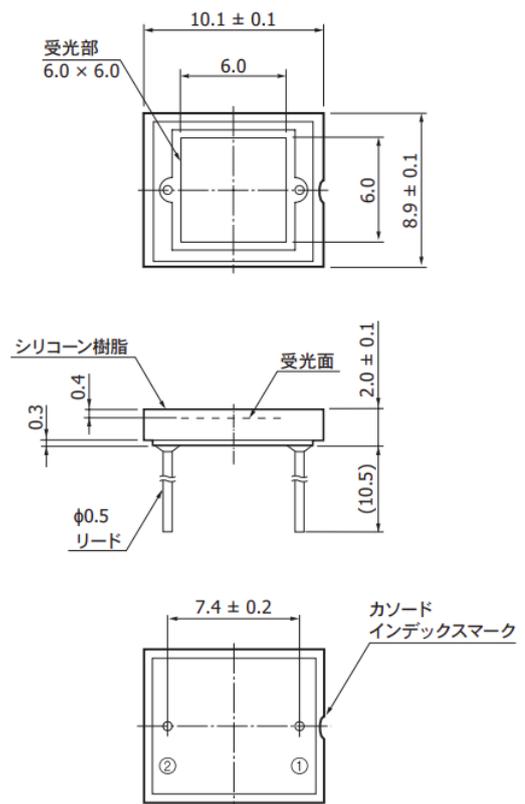


図 4.12: 浜松ホトニクス製 S13360-6025CS の外形寸法図 [27]

4.2.3 PCB

図 4.13 に ΔE 検出器で用いた PCB の設計図、図 4.14 に E 検出器で用いた PCB の設計図、図 4.15 に図 4.13 で示した PCB の回路図、図 4.16 に図 4.14 で示した PCB の回路図を示す。図 4.13 は上流側から見て右上側と左下側の PCB の図面である。図 4.14 は上流側から見て右側の PCB の図面である。実線部分は表側から LEMO コネクタを接続 (裏側からはんだ付け) し、破線部分は裏側から MPPC を接続 (表側からはんだ付け) している。

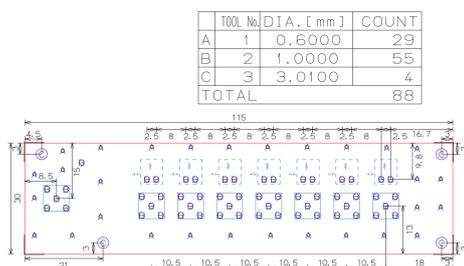


図 4.13: ΔE 検出器で用いた PCB の設計図。上流側から見て右上側と左下側の PCB を表す。実線部分は表側から LEMO コネクタを接続 (裏側からはんだ付け) し、破線部分は裏側から MPPC を接続 (表側からはんだ付け) している。

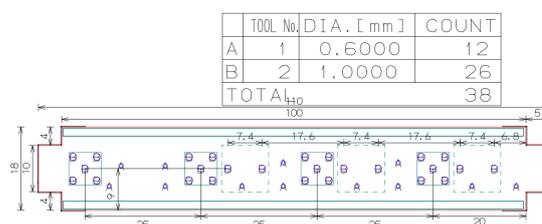


図 4.14: E 検出器で用いた PCB の設計図。図 4.14 は上流側から見て右側の PCB を表す。実線部分は表側から LEMO コネクタを接続 (裏側からはんだ付け) し、破線部分は裏側から MPPC を接続 (表側からはんだ付け) している。

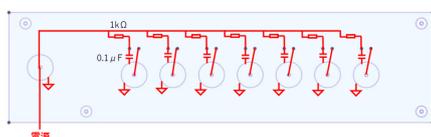


図 4.15: 図 4.13 で示した PCB の回路図。抵抗は $1k\Omega$ 、コンデンサは $0.1\mu F$ のものを用いた。

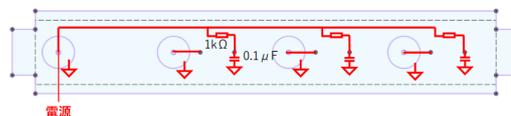


図 4.16: 図 4.14 で示した PCB の回路図。抵抗は $1k\Omega$ 、コンデンサは $0.1\mu F$ のものを用いた。

4.2.4 NIM-EASIROC

EASIROC(Extended Analogue Silicon pm Integrated Read Out Chip) はフランスの Ω グループが開発した汎用の MPPC 読み出し用 ASIC である [29]。EASIROC は省電力 (5 mV/ch) で、32 個の MPPC を同時に読み出すことができ、増幅率調節可能なアンプ、波形整形増幅器、discriminator を各チャンネルが有している。また、inputDAC と呼ばれる内蔵 DAC により $0\sim 4.5\text{ V}$ の範囲で 32 個の MPPC に印加するバイアス電圧を個別に調節できる。図 4.17 に EASIROC の内部回路の概要を示す。

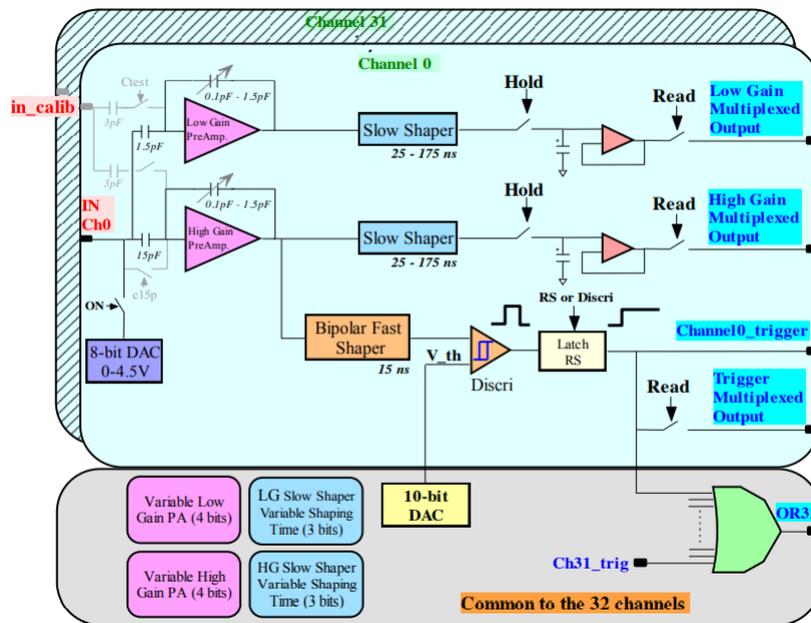


図 4.17: EASIROC の内部回路の概要 [29]

8-bit Input DAC

各チャンネルの Input ラインには 8-bit Input DAC が搭載されている。各チャンネルの印加電圧を個別に調整することができ、0 ~ 4.5 V の範囲で 20 mV ごとに変更できる。

Preamp

入力信号は 2 つのコンデンサによって High gain と Low gain に 10:1 の割合で分けられる。それぞれに Preamp が搭載されており、キャパシタンスを 0.1 ~ 1.5 pF で変更することで信号の増幅率を変えることができる。

Slow Shaper

Preamp によって増幅された信号は Slow Shaper によって整形される。整形の時定数は 25 ~ 175ns の範囲で変更できる。Slow Shaper で整形された信号は HOLD トリガーが入力されたときにその電圧がコンデンサに記録される。ACCEPT トリガーが入力されたタイミングで各チャンネルに記録された電圧は出力され、ADC によりデジタルデータに変換される。

Fast Shaper & Discriminator

High Gain には Preamp の後に Fast Shaper が搭載されている。Fast Shaper では 15 ns の時定数で信号が整形され、Discriminator に入力される。Discriminator の閾値は全チャンネルで共通であり、NIM-EASIROC の DAC code という値を変更することで指定できる。信号の波高が閾値を超えた場合にはデジタル信号が出力され、トリガー生成や TDC データの取得に使用される。

NIM-EASIROC でデータを取得するためには 3 つのトリガーを入力する必要がある。

HOLD

HOLD トリガーは Slow Shaper で整形された信号の電圧をコンデンサに記録するために用いられる。図 4.18 は HOLD トリガーのタイミングによる、保存される電荷情報の違いを示している。HOLD トリガーのタイミングがピークより早い場合、もしくは遅い場合は本来の値より小さい値が保存される。HOLD トリガーのタイミングと信号のピークのタイミングが一致するようにケーブルディレイなどを用いて調整する必要がある。

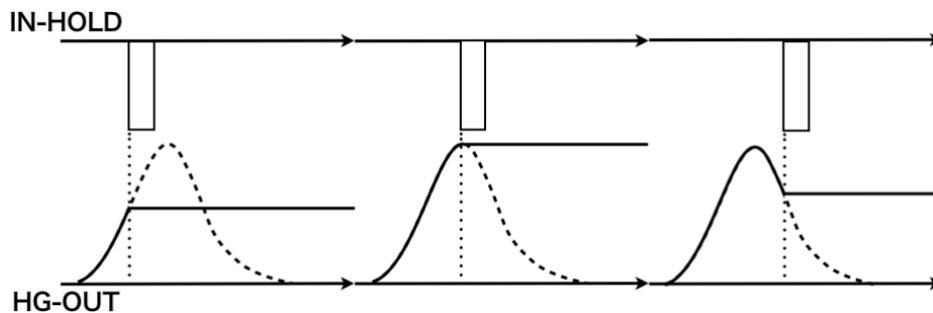


図 4.18: HOLD トリガーのタイミングによる保存される電荷情報の違い [29]。HOLD トリガーのタイミングがピークのタイミングと一致しない場合には正しい電荷情報が保存されないため調整する必要がある。

T STOP

T STOP トリガーは TDC のデータを記録するために用いられる。NIM-EASIROC の TDC は common stop であり、T STOP トリガーは common stop 信号として用いられる。図 4.19 は NIM-EASIROC における TDC の記録の概念図を示している。Fast Shaper の出力信号の波高が閾値を上回る時刻 (Leading) と下回る時刻 (Trailing) の情報が、T STOP トリガーとの時間差として記録される。HOLD トリガーから約 200 ns 遅らせて入力する必要がある。

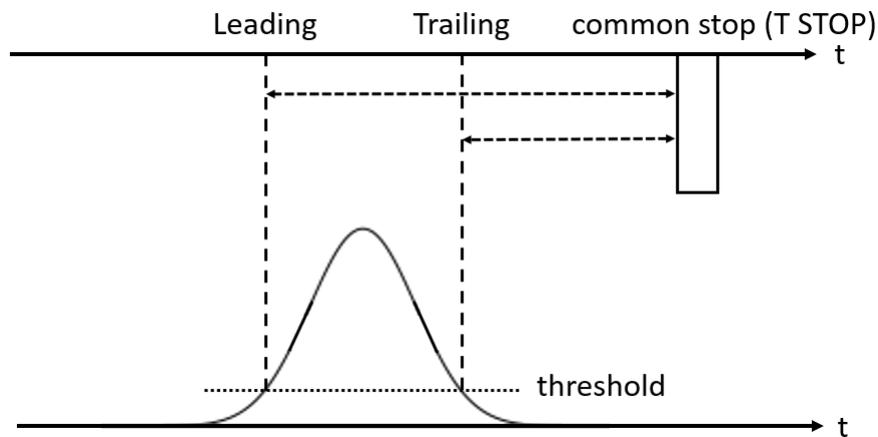


図 4.19: TDC の記録の概念図

ACCEPT

ACCEPT トリガーは DAQ 用 PC にデータを送信するために用いられる。ACCEPT トリガーが入力されたタイミングで PC へとデータが送信される。HOLD トリガーから約 $2.5 \mu\text{s}$ 遅らせて入力する必要がある。

NIM-EASIROC はトリガー生成を行うことができる。多チャンネルであることを利用し、NIM-EASIROC 内で OR 回路や AND 回路を作ることによってトリガーを生成することができる。

トリガーマスク

NIM-EASIROC では最大 64 チャンネルを同時に測定することができるが、使用しないチャンネルにはトリガーマスクすることができる。トリガーマスクをしていないチャンネルのみで論理回路の条件を満たした場合にトリガーを生成する。

ヒットナンバーズレッシュヨルド

指定したチャンネル数より多くのチャンネルでスレッシュヨルドを超える信号が入力された時にトリガーを生成する。ヒットナンバーズレッシュヨルドを 10 に設定した場合、64 チャンネルのうち 11 チャンネル以上のチャンネルに信号が入力された場合のみトリガーを生成する。

4.3 検出器と NIM-EASIROC の組み合わせ

BSD の E 検出器には 72 チャンネルあり、 ΔE 検出器には 28 チャンネルある。NIM-EASIROC は 1 台につき 64 チャンネルまでしか測定読み出すことができないため、 E 検出器には 2 台、 ΔE 検出器には 1 台の合計で 3 台の NIM-EASIROC を使用している。NIM-EASIROC の使用するチャンネルと検出器の ID の組み合わせを付録の表 A.1,A.2, A.3,A.4 に示す。 E 検出器に使用しているものを EASIROC1,2、 ΔE 検出器に使用しているものを EASIROC3 とする。

4.4 要求性能

陽子と重陽子を識別するためには $\Delta E - E$ プロット上で陽子と重陽子のイベントを十分に分離できる必要がある。そのために必要となる検出器のエネルギー分解能を次のように見積もった。図 4.20 は陽子と重陽子が BSD に垂直に入射した場合の $\Delta E - E$ プロットを表している。横軸は ΔE 検出器でのエネルギー損失、縦軸は E 検出器でのエネルギー損失を表す。黒線は陽子が入射した場合、赤線は重陽子が入射した場合を示している。図 2.6 より、順運動学における陽子の散乱角度 $\theta = 160^\circ$ における重陽子のエネルギーはおおよそ 40 ~ 110 MeV であるためその範囲を黒い破線の四角で示している。エネルギー分解能が重要となるのは 1,2 層目ともにエネルギー損失が小さい領域である。1 層目における重陽子のエネルギー損失 ΔE の最小値はおおよそ $\Delta E = 7$ MeV である。このときの陽子のエネルギー損失との差は約 3.5 MeV である。これらをそれぞれ $3\sigma_{\Delta E}$ ずつ、合計 $6\sigma_{\Delta E}$ 分離するためには $3\sigma_{\Delta E} + 3\sigma_{\Delta E} = 3.5$ MeV、すなわち $\sigma_{\Delta E} = 0.58$ MeV である。エネルギー分解能がエネルギーの平方根に比例する ($\sigma(\Delta E) = a\sqrt{\Delta E}$) ことを考慮すると 1 MeV での分解能は $0.58/\sqrt{8} \sim 0.21$ MeV である。同様に 2 層目についても考える。2 層目における重陽子のエネルギー損失 E の最小値はおおよそ 17 MeV である。このときの陽子のエネルギー損失との差は約 15 MeV である。これらをそれぞれ $3\sigma_E$ ずつ、合計 $6\sigma_E$ 分離するためには $6\sigma_E = 15$ MeV、すなわち $\sigma_E = 2.5$ MeV である。エネルギー分解能がエネルギーの平方根に比例する ($\sigma(E) = a\sqrt{E}$) ことを考慮すると 1 MeV での分解能は $2.5/\sqrt{17} \sim 0.61$ MeV である。

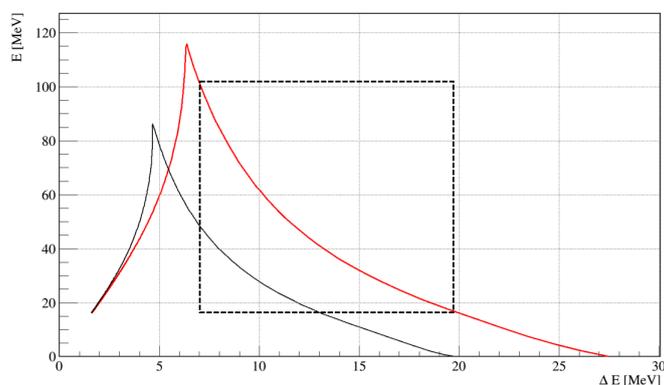


図 4.20: 陽子と重陽子が BSD に入射した際の $\Delta E - E$ プロット。横軸は ΔE 検出器でのエネルギー損失、縦軸は E 検出器でのエネルギー損失を表す。黒の実線は陽子が入射した場合、赤線は重陽子が入射した場合を示している。重陽子に関して、後方散乱イベントの重陽子のエネルギーはおおよそ 40 ~ 110 MeV であり、黒の破線はその範囲を表している。

第 5 章

BSD の開発と性能評価

本章では BSD の開発と性能評価について議論する。5.1 節では BSD のプロトタイプ検出器のエネルギー分解能について述べる。5.2 節では本実験で用いる BSD の開発について述べ、5.3 節では大阪大学核物理研究センターで行った BSD の性能評価実験とその結果について議論する。

5.1 プロトタイプ検出器の性能評価

BSD を開発するにあたり、 E 検出器のシンチレータ 1 つをプロトタイプ検出器として作成しエネルギー分解能の評価を行った [31]。プロトタイプ検出器のシンチレータには BSD の E 検出器と同様に ELJEN TECHNOLOGY 社製の EJ-200 を使用している。 E のシンチレータは幅 70 mm × 高さ 20 mm × 厚さ 60 mm であり、シンチレータの下流側には 3 つの MPPC が接着してある。ただし接着にはオプティカルセメントではなくオプティカルグリース (ELJEN TECHNOLOGY 社製 EJ-550) を使用している。MPPC は S13360-6025CS を使用し、読み出し回路には NIM-EASIROC を使用している。

5.1.1 エネルギー分解能の評価

この性能評価実験では ^{22}Na ガンマ線源についてエネルギースペクトルの測定を行い、それぞれの MPPC についてコンプトンエッジのフィッティングを行うことでエネルギー分解能を評価した。コンプトン散乱のエネルギースペクトルは以下のクライン-仁科の公式に従って計算できる。

$$\frac{d\sigma}{dT} = \frac{\pi r_e^2}{m_e \gamma^2} \left[2 + \frac{s^2}{\gamma^2(1-s)^2} + \frac{s}{1-s} \left(s - \frac{2}{\gamma} \right) \right] \quad (5.1)$$

$$\gamma = \frac{h\nu}{m_e} \quad (5.2)$$

$$s = \frac{T}{h\nu} \quad (5.3)$$

ここで

$$T : \text{反跳電子のエネルギー} \quad (5.4)$$

$$h\nu : \text{入射ガンマ線のエネルギー} \quad (5.5)$$

$$m_e : \text{電子質量} \quad (5.6)$$

$$r_e : \text{電子半径} \quad (5.7)$$

である。コンプトンエッジのエネルギー (反跳電子の最大エネルギー) T_{max} は以下のように書ける。

$$T_{max} = h\nu \frac{2\gamma}{1 + 2\gamma} \quad (5.8)$$

^{22}Na のガンマ線のエネルギーは 0.511 MeV と 1.274 MeV であり、電子質量は 0.511 MeV であるのでこれらを式 5.8 に代入すると ^{22}Na のコンプトンエッジのエネルギーはそれぞれ 0.341 MeV と 1.061 MeV となる。フィッティングは 1.061 MeV のコンプトンエッジに対してのみ行った。図 5.1, 5.2, 5.3 はそれぞれ 3 つの MPPC から得たデータについてフィッティングしたものを示している。表 5.1 はフィッティングにより得た分解能を示している。ただし、分解能はエネルギーの平方根に比例する ($\sigma(E) = a\sqrt{E}$) ことを用いて、1 MeV での分解能に換算している。

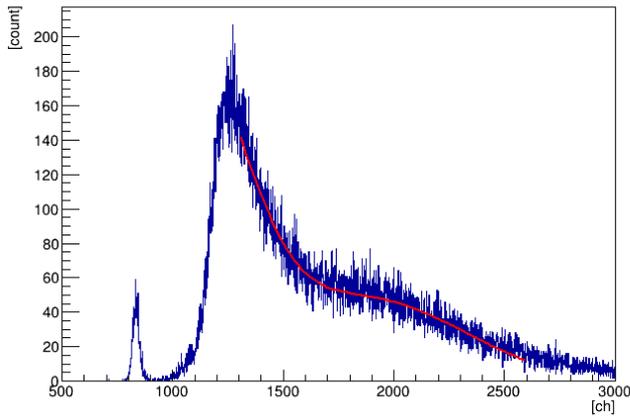


図 5.1: MPPC1 から得らデータにフィッティングを行った図 [31]。横軸は TOT_{cor} のチャンネル、縦軸はカウント数を表す。EASIROC によると思われるスレッシュホールドが 0.511 MeV のガンマ線のコンプトンエッジ付近に見えたため、フィッティングは 1200 ch 付近に見えるピークよりも大きいチャンネル数の範囲で行った。

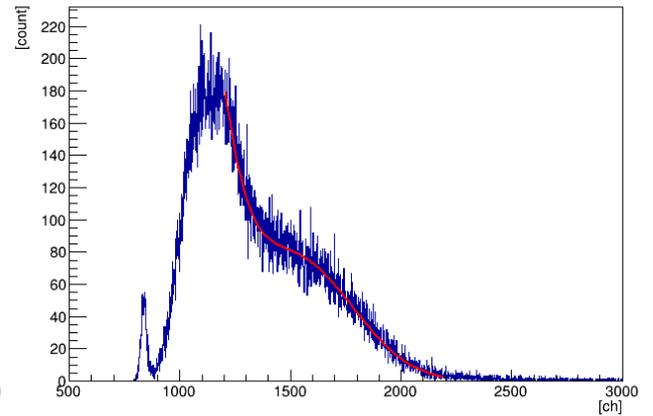


図 5.2: MPPC2 から得らデータにフィッティングを行った図 [31]。横軸は TOT_{cor} のチャンネル、縦軸はカウント数を表す。EASIROC によると思われるスレッシュホールドが 0.511 MeV のガンマ線のコンプトンエッジ付近に見えたため、フィッティングは 1200 ch 付近に見えるピークよりも大きいチャンネル数の範囲で行った。

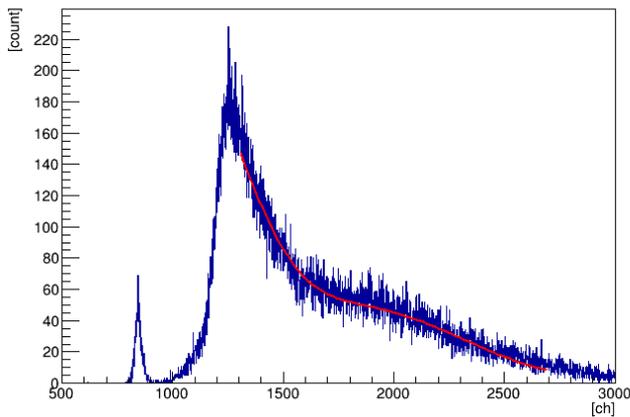


図 5.3: MPPC3 から得らデータにフィッティングを行った図 [31]。横軸は TOT_{cor} のチャンネル、縦軸はカウント数を表す。EASIROC によると思われるスレッシュホールドが 0.511 MeV のガンマ線のコンプトンエッジ付近に見えるため、フィッティングは 1200 ch 付近に見えるピークよりも大きいチャンネル数の範囲で行った。

MPPC ID	1 MeV での分解能 (MeV)
1	0.294(4)
2	0.280(2)
3	0.296(3)

表 5.1: フィッティングすることで得た各 MPPC の 1 MeV での分解能 a (MeV)[31]。括弧内の数字は誤差を表す。

それぞれの MPPC についてエネルギー分解能の評価とキャリブレーションを行った後に、同一のイベントにおける 3 つの MPPC の波高の平均をとった。これについてもエネルギー分解能の評価を行った。

$$Q_{ave} = \frac{1}{3}(Q_1 + Q_2 + Q_3) \quad (5.9)$$

$Q_{1,2,3}$ は 3 つの MPPC が記録したエネルギーを表す。図 5.4 は Q_{ave} 分布をフィッティングしたものである。この時の 1 MeV での分解能は 0.102(1) MeV であり、目標分解能は 0.61 MeV であるため十分に達成している。

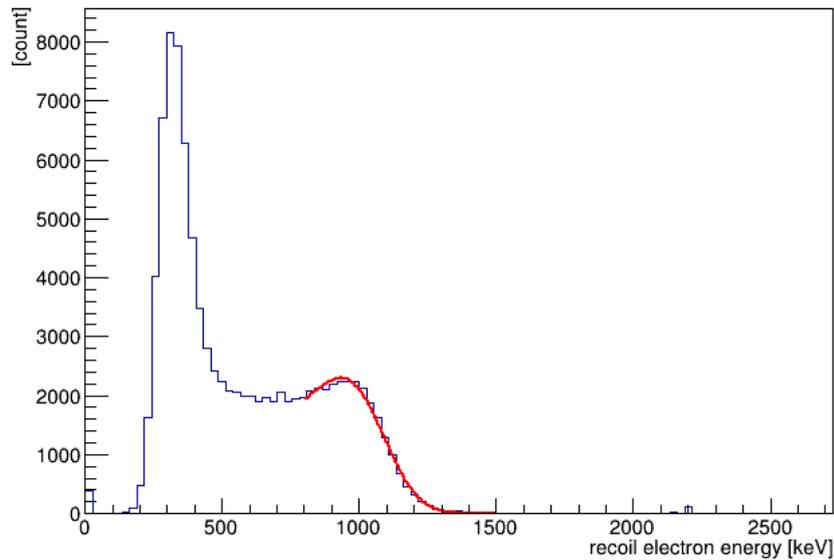


図 5.4: 式 5.9 より得られたヒストグラムにフィッティングした図 [31]。横軸はエネルギー、縦軸はカウント数を表す。フィッティングには 1.274 MeV のガンマ線のみ含み、それに伴ってフィッティングの範囲も 1,000 keV 付近としている。

5.2 BSD の開発

本実験では電荷情報の記録に ADC ではなく、ディスクリミネーターの出力信号の Leading と Trailing の時間差である TOT(Time Over Threshold) を用いる。4.2.4 節で述べたように NIM-EASIROC の ADC で電荷情報を正しく記録するためには HOLD トリガーを適切なタイミングで入力する必要がある。RIBF での本実験では NIM-EASIROC が生成するトリガーは用いずほかの検出器が生成したものをを用いるが、このトリガー生成に時間が必要となるため HOLD トリガーを適切なタイミングで NIM-EASIROC に入力することができない。一方で TDC では common stop である TSTOP トリガーとの時間差が記録される。Leading と Trailing の時間差である TOT は入力する TSTOP トリガーが遅れても TDC データは取得できるため、電荷情報の記録に TOT を採用した。また、TOT とエネルギーには線形性はないため ADC と TOT の相関を調べることで TOT とエネルギーの対応関係を調べた。

5.2.1 ペDESTAL 測定

検出器と NIM-EASIROC を接続せずに、クロック信号を NIM-EASIROC にトリガーとして入力することでペDESTAL を測定した。図 5.5 はペDESTAL 測定で得られたヒストグラムを示している。EASIROC1,2,3 の各チャンネルについて測定を行い、ガウス関数でフィッティングして得られたペDESTAL の値を付録の表 A.8,A.9,A.10 に示す。ペDESTAL は EASIROC の入力チャンネルによって異なるがおおよそ 810 ~ 830 ch である。

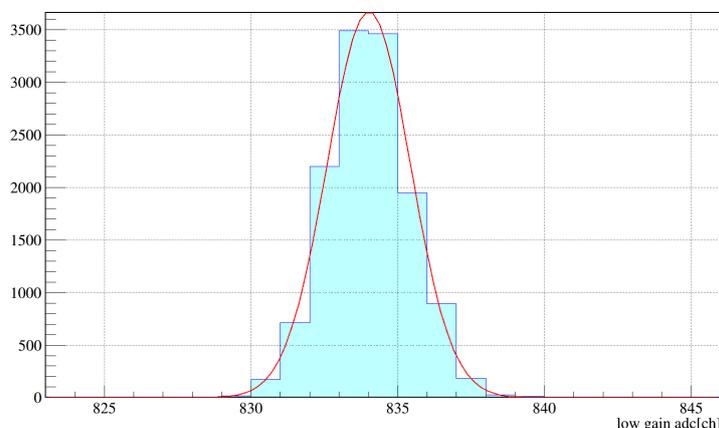


図 5.5: ペDESTAL 測定で得られたヒストグラム。横軸は MPPC0 の ADC low gain [ch]、縦軸はカウント数を示す。赤線はガウス関数でフィッティングを行ったものである。

5.2.2 ゲイン調整

本実験では最大約 100 MeV を測定することに対して、ガンマ線源を用いた場合には十分に大きいエネルギーを測定できない。そのため宇宙線のエネルギー損失を測定し、各 MPPC の印加電圧を変えることでゲイン調整を行った。地表に降り注ぐ宇宙線のほとんどは μ 粒子である。 μ 粒子の物質内でのエネルギー損

失は速度に依存するが、ある速度付近ではエネルギー損失の大きさはほぼ一定となる。これを最小電離損失 (Minimum Ionizing Particle : MIP) といい、多くの宇宙線のエネルギー損失はこの値である。その大きさは $-dE/dx \sim 2 \text{ MeVg}^{-1}\text{cm}^2$ であり BSD に使用しているプラスチックシンチレータの密度は 1.023 gcm^{-3} であるため 1 cm あたり約 2 MeV のエネルギー損失を起こす [32]。このことを用いて大雑把なゲイン調整を行った。

図 5.6 は宇宙線を測定した際の BSD のセットアップの模式図である。検出器同士でコインシデンスをとるために検出器を 90° 回転させて配置した。 E 検出器に関してはエネルギー損失を大きくするという理由もある。また、図 5.7 は回路図を表しており、表 5.2,5.3,5.4 に EASIROC1,2,3 の設定を示している。それぞれの EASIROC のトリガー条件は 64chOR に設定した。また、MPPC を接続していないチャンネルにはトリガーマスクをした。 E 検出器に接続している EASIROC1 に関しては CH30,31,62,63、 E 検出器の残りのチャンネルに接続している EASIROC2 に関しては CH0 ~ 11 以外、 ΔE 検出器に接続している EASIROC3 に関しては CH0 ~ 13, 16 ~ 29 以外をトリガーマスクをした。EASIROC1,2 はヒットナンバースレッシュホールドを 3、EASIROC3 はヒットナンバースレッシュホールドを 6 に設定した。 E 検出器に関して、例えば MPPC0,1,2 と 30,31,32 のコインシデンスをとることで地面に対して垂直に近い角度で入射した宇宙線のイベントのみを選ぶことができる。この時の宇宙線の各シンチレータ内での飛行距離は 7 cm であるため約 14 MeV のエネルギー損失が起こる。したがって ADC のピークを 14 MeV とみなすことができる。 ΔE 検出器に関して、MPPC72 ~ 85 のコインシデンスをとることで全てのシンチレータを通過したイベントを選ぶことができる。この時の各シンチレータ内での飛行距離は 1 cm であるため約 2 MeV のエネルギー損失が起こる。したがって ADC のピークを 2 MeV とみなすことができる。図 5.8 は宇宙線を測定した際の ΔE の ADC のスペクトル、図 5.9 は E の ADC のスペクトルを表している。 ΔE は 2 MeV が約 40 ch、 E は 14 MeV が約 110 ch になるように印加電圧を調整した。調整後の印加電圧の付録の表 A.5,A.6,A.7 に示す。

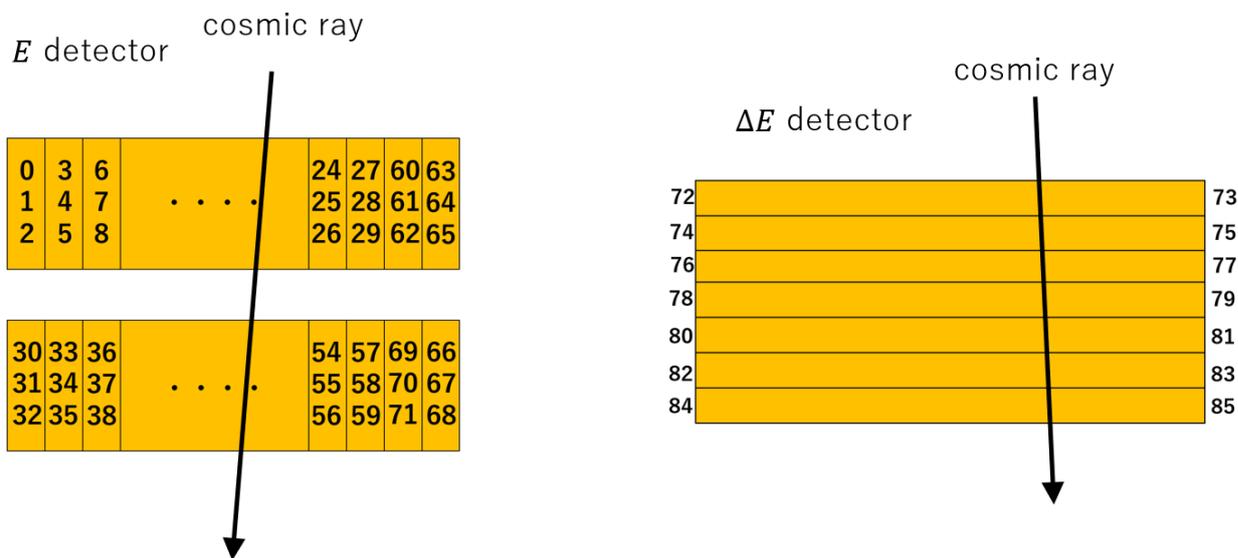


図 5.6: 宇宙線を測定した際の水平方向に見た BSD のセットアップ。左は E 検出器、右は ΔE 検出器を表し、番号は MPPC の ID を表している。図には載せていないが MPPC86~99 も同様に使用している。

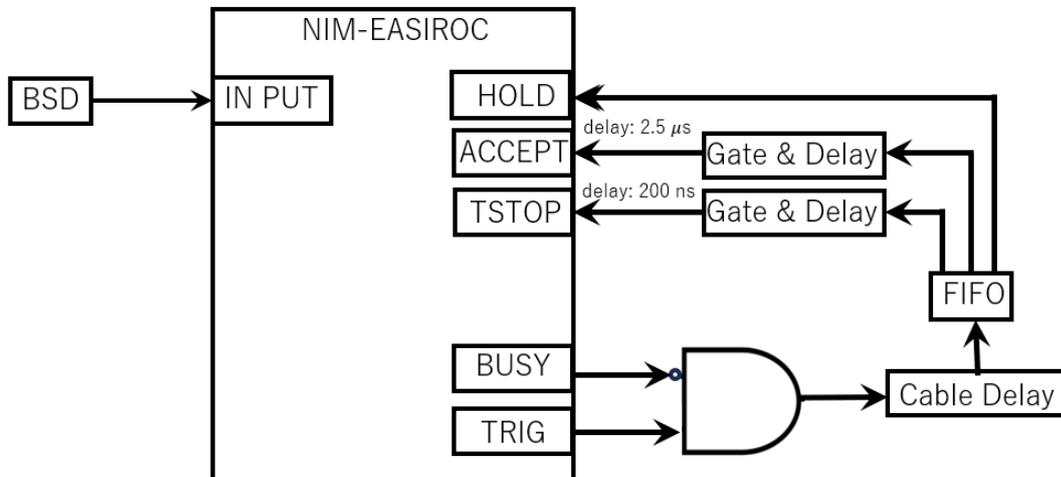


図 5.7: BSD で宇宙線を測定した際の回路図。NIM-EASIROC が生成するトリガー信号とビジー信号のアンチコインシデンスをとり、ケーブルディレイを用いて HOLD に入力するタイミングを調整している。このケーブルディレイで EASIROC1,2 では 120 ns、EASIROC3 では 20 ns の遅延をかけている。ケーブルディレイの後は FAN IN/FAN OUT(FIFO) を用いて信号を 3 つに分けた後、それぞれ HOLD, ACCEPT, TSTOP に入力した。ゲートジェネレーターを用いて ACCEPT には 2.5 μ s、TSTOP には 200 ns の遅延をかけた。

表 5.2: 宇宙線を測定した際の EASIROC1 の設定

High gain Preamp キャパシタンス	100 fF
Low gain Preamp キャパシタンス	200 fF
Slow Shaper 時定数	150 ns
DAC code	500
トリガーマスク	CH30,31,62,63
トリガー条件	64chOR
ヒットナンバーズレッシュヨルド	3

表 5.3: 宇宙線を測定した際の EASIROC2 の設定

High gain Preamp キャパシタンス	100 fF
Low gain Preamp キャパシタンス	200 fF
Slow Shaper 時定数	150 ns
DAC code	500
トリガーマスク	CH12 ~ 63
トリガー条件	64chOR
ヒットナンバーズレッシュヨルド	3

表 5.4: 宇宙線を測定した際の EASIROC3 の設定

High gain Preamp キャパシタンス	100 fF
Low gain Preamp キャパシタンス	200 fF
Slow Shaper 時定数	50 ns
DAC code	700
トリガーマスク	CH14,15,30~63
トリガー条件	64chOR
ヒットナンバーレシヨルド	6

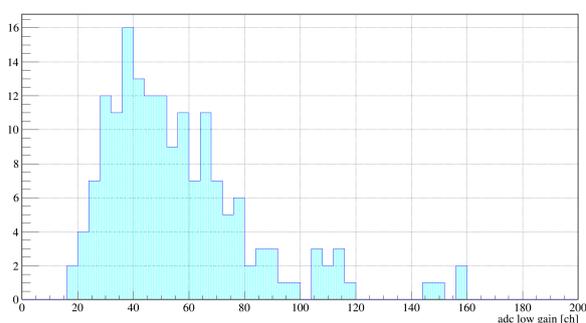


図 5.8: 宇宙線を測定した際の MPPC72(ΔE) の ADC スペクトル。横軸は ADC [ch]、縦軸はカウント数を表している。ただしペダスタルは引いている。ピークのエネルギーは 2 MeV と考えられ、全チャンネルで 40 ch 付近に調整した。

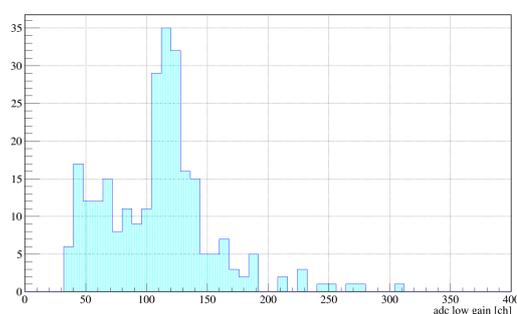


図 5.9: 宇宙線を測定した際の MPPC0(E) の ADC スペクトル。横軸は ADC [ch]、縦軸はカウント数を表している。ただしペダスタルは引いている。ピークのエネルギーは 14 MeV と考えられ、全チャンネルで 110 ch 付近に調整した。

5.2.3 TOT と ADC の対応関係

宇宙線を測定する際に印加電圧を大きくしゲインを大きくすることで TOT と ADC の相関を測定した。この測定の印加電圧は付録の表 A.5,A.6,A.7 の値に対して ΔE 検出器では約 6 V、 E 検出器で約 11 V 大きくした。セットアップは図 5.6 と同様で、回路図も図 5.7 と同様である。表 5.5,5.6,5.7 はこの測定での EASIROC1,2,3 の設定を示している。この測定によりエネルギーに対する TOT の非線形性を補正した。補正した TOT を TOT_{cor} とする。

表 5.5: TOT と ADC の相関を測定した際の EASIROC1 の設定

High gain Preamp キャパシタンス	300 fF
Low gain Preamp キャパシタンス	200 fF
Slow Shaper 時定数	150 ns
DAC code	500
トリガーマスク	CH30,31,62,63
トリガー条件	64chOR
ヒットナンバーレシヨルド	0

表 5.6: TOT と ADC の相関を測定した際の EASIROC2 の設定

High gain Preamp キャパシタンス	300 fF
Low gain Preamp キャパシタンス	200 fF
Slow Shaper 時定数	150 ns
DAC code	500
トリガーマスク	CH12 ~ 63
トリガー条件	64chOR
ヒットナンバーレシオ	0

表 5.7: TOT と ADC の相関を測定した際の EASIROC3 の設定

High gain Preamp キャパシタンス	300 fF
Low gain Preamp キャパシタンス	200 fF
Slow Shaper 時定数	50 ns
DAC code	500
トリガーマスク	CH14,15,30~63
トリガー条件	64chOR
ヒットナンバーレシオ	0

図 5.10 は MPPC72(ΔE) の TOT と ADC の相関、図 5.11 は MPPC0(E) の TOT と ADC の対応関係を示している。横軸は TOT [ns]、縦軸は ADC [ch] を示している。曲線は 2 次元ヒストグラムをフィッティングしたもので、フィッティングには 7 次多項式を用いた。

$$y = p_0 + p_1x + p_2x^2 + p_3x^3 + p_4x^4 + p_5x^5 + p_6x^6 + p_7x^7 \quad (5.10)$$

ここで $p_0 \sim p_7$ はフィッティングパラメータである。フィッティングによって得られたパラメータの詳細を付録の A.11,A.12,A.13 に示す。

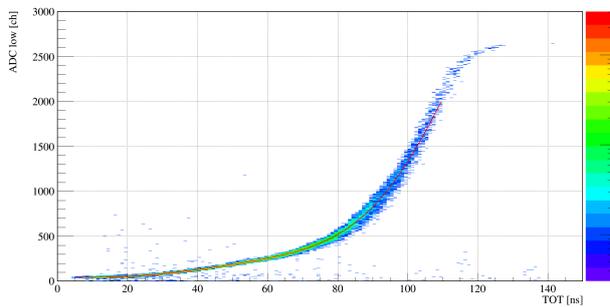


図 5.10: MPPC72(ΔE) の TOT と ADC の相関。横軸は TOT [ch]、縦軸は ADC [ch] を表している。ただし ADC のペDESTALは引いている。赤線はフィッティングの結果を示しており、フィッティング関数は式 5.10 を用いた。

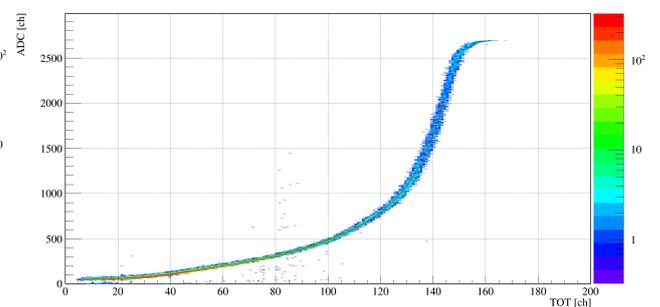


図 5.11: MPPC0(E) の TOT と ADC の相関。横軸は TO([ch]、縦軸は ADC [ch] を表している。ただし ADC のペDESTALは引いている。赤線はフィッティングの結果を示しており、フィッティング関数は式 5.10 を用いた。

5.3 BSD の性能評価実験

大阪大学核物理研究センター (Research Center for Nuclear Physics : RCNP) で高エネルギーの陽子ビームと複数の標的を用いて実験を行った。この実験の目的としては本実験で測定する重陽子のエネルギーに近い高エネルギーの粒子を測定することにある。この章では RCNP で行った実験のセットアップおよび結果について述べる。

5.3.1 実験セットアップ

この実験では複数の標的に対して 230 MeV の陽子を入射しノックアウト反応によって散乱した粒子の測定を行った。図 5.12 に実験のセットアップを示す [33]。ノックアウト反応によって散乱する粒子は GR(Grand Raiden) と LAS(Large Acceptance Spectrometer) によって検出される。BSD は LAS の下流側に設置し、LAS を通過した粒子を検出した。性能評価を目的として FSD も LAS の下流側に設置した。

LAS

LAS の方向に散乱した粒子は双極磁石によって軌道が曲げられ、特定の磁気硬度 $B\rho$ を持つ粒子のみが検出器へと入射する。セットアップより軌道半径は決まっており、その値は $\rho=1.75$ m である。双極磁石の磁場 B を変更することで $B\rho$ の値を変更することができる。また、LAS の位置は測定したい粒子の散乱角度によって $0 \sim 130^\circ$ の範囲で変更できる。焦点面には 2 層の VDC(Vertical Drift Chamber) と 2 層のプラスチックシンチレータが設置されている。プラスチックシンチレータの厚さは 1 層目が 2 mm、2 層目が 5mm であり、これらのプラスチックシンチレータを通過した粒子の検出を BSD で行った。LAS の性能を表 5.8、今回の実験の条件を表 5.9 に示す。条件には便宜的に番号を付けた。

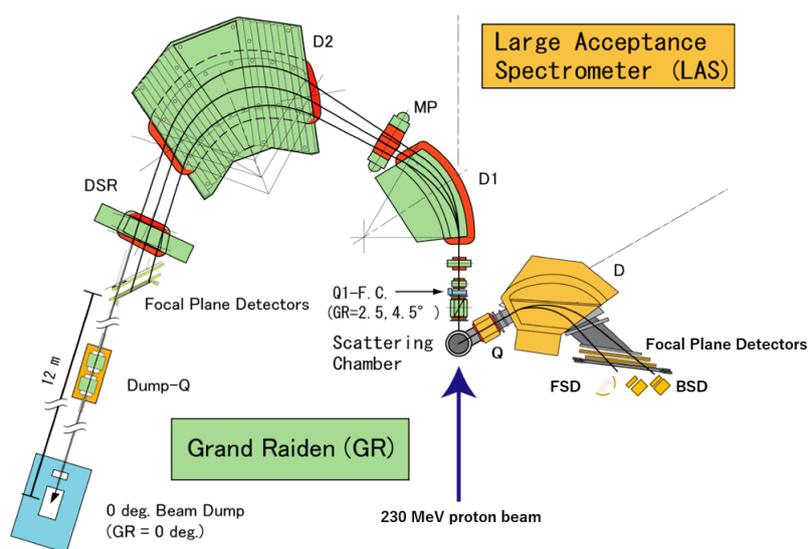


図 5.12: $A(p, pX)$ 反応実験のセットアップ [33]。散乱する粒子は GR と LAS によって検出される。性能評価のためにこの実験では FSD と BSD を LAS の下流側に設置した。[33] から引用し一部改変。

表 5.8: LAS の性能 [33]

軌道半径	1.75 m
分散	2 m
立体角	~20 msr
水平方向の平面角	±60 mrad
鉛直方向の平面角	±100 mrad
運動量アクセプタンス	30 %
角度 θ_{LAS}	0~130°

表 5.9: RCNP での実験の条件。 $B\rho$ は中心軌道の磁気硬度を表す。

条件	標的	角度 θ_{LAS} [°]	磁気硬度 $B\rho$ [Tm]
1	CD ₂	67.685	1.09
2	CD ₂	67.685	1.144
3	CD ₂	67.685	1.171
4	⁴⁰ Ca	50.5	1.819

LAS と BSD の位置関係

図 5.13 は図 5.12 の BSD 周辺を拡大した図を表している。FSD のデータは結果の解析には使わないため省略している。LAS の検出器は 2 層の VDC と 2 層のプラスチックシンチレータから構成され、これらを通じた粒子を BSD で検出した。BSD は図 5.13 に示すように配置し、LAS のシンチレータに対して 55° 傾けている。このように傾けることで LAS のシンチレータを通じた散乱粒子が BSD に垂直に入射するようにした。この実験のセットアップでは BSD に入射する粒子は限られており、陽子と重陽子以外は LAS のシンチレータ内でエネルギーを失うため BSD に到達しない。表 5.10 に BSD に入射する粒子の種類と BSD でのエネルギー損失を示す。

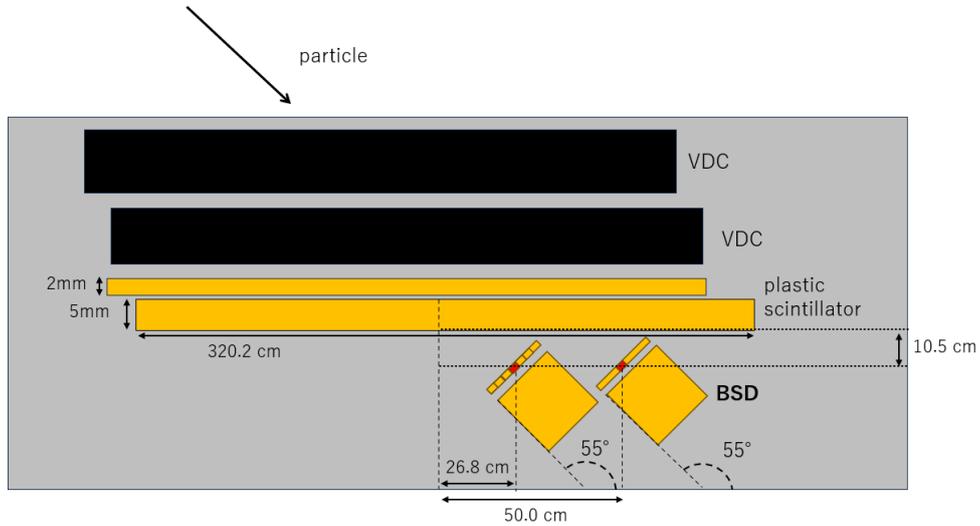


図 5.13: $A(p, pX)$ 反応実験のセットアップの拡大図。黒は VDC、黄色はプラスチックシンチレータ、灰色は LAS の架台を表している。BSD は LAS のシンチレータに対して傾けて配置することで散乱粒子が垂直に入射するようにした。

表 5.10: BSD に入射する粒子と BSD でのエネルギー損失。 $\Delta E_{p,d}$ は 1 層目でのエネルギー損失、 $E_{p,d}$ は 2 層目でのエネルギー損失を表す。条件 4 では入射する陽子のエネルギーが大きいため BSD を貫通している。

条件	ΔE_p [MeV]	E_p [MeV]	ΔE_d [MeV]	E_d [MeV]
1	11.66	22.65	0	0
2	9.58	32.18	0	0
3	8.84	36.61	0	0
4	3.58	40.92	14.83	35.29

BSD のセットアップ

図 5.14、5.15 この実験での回路図を示す。図 5.14 に示すように、BSD で使用している各 EASIROC が生成するトリガー信号を FIFO に入力し、その出力は GTO モジュールへと入力した。GTO は計 4 台ある EASIROC のビジー信号の制御を行う。また、BSD で使用している EASIROC からのビジー信号と、FSD から出力されるトリガー、ビジー信号も GTO に入力することでアンチコインシデンスをとっている。図 5.15 に示すように、GTO から出力された信号は、FIFO で分けられ、各 EASIROC の HOLD、TSTOP、ACCEPT に入力される。TSTOP と ACCEPT に入力する信号はゲートジェネレーターによってそれぞれ 200 ns、2.5 μ s 遅らせた。表 5.11,5.12,5.13 は各 EASIROC の設定を示しており、印加電圧の付録の表 A.5,A.6,A.7 の通りである。

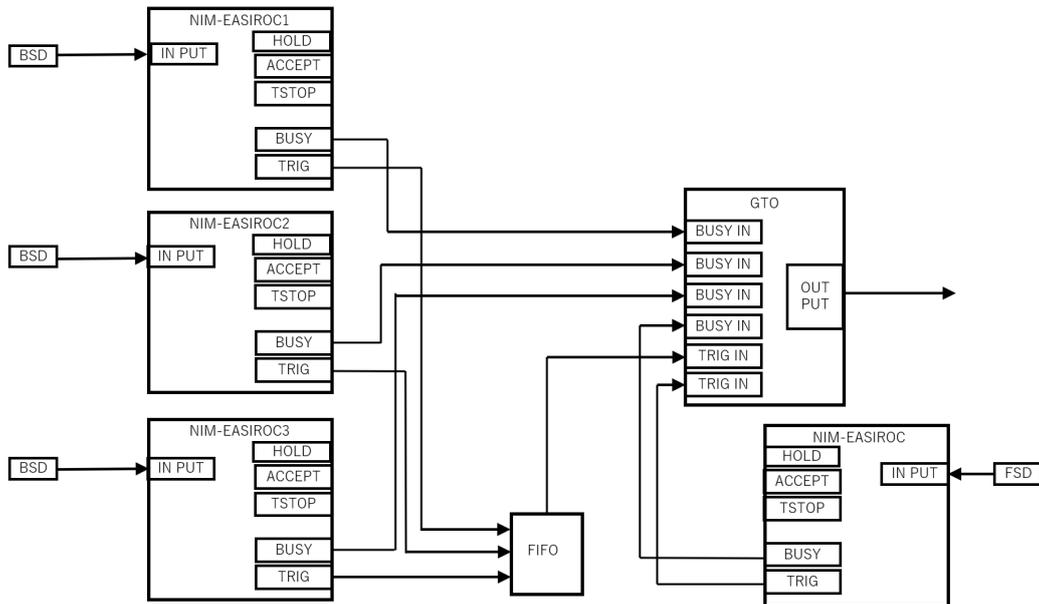


図 5.14: RCNP で行った実験での回路図 (前半)。BSD で使用している 3 つの EASIROC から出力されるトリガー信号を FIFO に入力し、その出力信号を GTO に入力した。また BSD で使用している各 EASIROC からのビジー信号および FSD で使用している EASIROC から出力されるトリガー、ビジー信号も GTO に入力した。

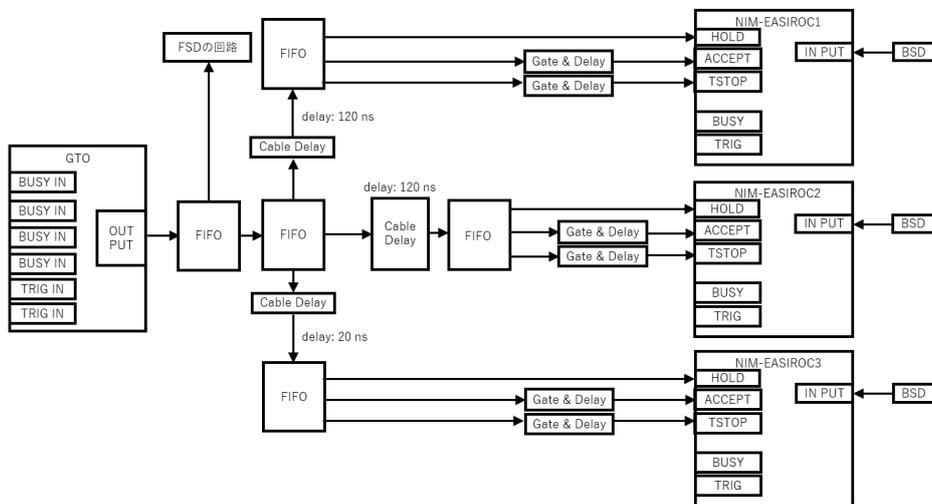


図 5.15: RCNP で行った実験での回路図 (後半)。GTO からの出力信号は FIFO で 2 つに分けられる。一方は FSD の回路につながっており、もう一方は再び FIFO によって 3 つに分けられる。ケーブルディレイによって EASIROC1,2 に入力する信号は 120 ns 遅らせ、EASIROC3 に入力する信号は 20 ns 遅らせた。そののちに再度 FIFO によって信号を 3 つに分け、1 つは HOLD に入力した。TSTOP と ACCEPT に入力した信号はゲートジェネレーターによってそれぞれ 200 ns、2.5 μ s 遅らせた。

表 5.11: RCNP で行った実験での EASIROC1 の設定

High gain Preamp キャパシタンス	300 fF
Low gain Preamp キャパシタンス	200 fF
Slow Shaper 時定数	150 ns
DAC code	500
トリガーマスク	CH30,31,36 ~ 38,52 ~ 54,62,63
トリガー条件	64chOR
ヒットナンバーズレッシュヨルド	0

表 5.12: RCNP で行った実験での EASIROC2 の設定

High gain Preamp キャパシタンス	300 fF
Low gain Preamp キャパシタンス	200 fF
Slow Shaper 時定数	150 ns
DAC code	500
トリガーマスク	CH2,12 ~ 63
トリガー条件	64chOR
ヒットナンバーズレッシュヨルド	0

表 5.13: RCNP で行った実験での EASIROC3 の設定

High gain Preamp キャパシタンス	300 fF
Low gain Preamp キャパシタンス	200 fF
Slow Shaper 時定数	50 ns
DAC code	500
トリガーマスク	CH14,15,30~63
トリガー条件	64chOR
ヒットナンバーズレッシュヨルド	0

5.3.2 結果

解析には TOT のデータと、宇宙線の測定と式 5.10 よりで TOT の非線形性を補正したもの (TOT_{cor}) を用いた。

粒子識別

図 5.16 は条件 1,2,3 で測定したデータを同時にプロットしたものを示している。横軸は MPPC78(ΔE) の TOT [ns] を示し、縦軸は MPPC16(E) の TOT [ns] を示している。これらの条件では陽子のみが BSD に入射して 2 層目の E 検出器で全運動エネルギーを失うため、図 5.16 では横軸のおよそ 50 ~ 70 ns にかけて陽子由来の筋が見える。図 5.17 は条件 4 で測定したデータを示している。この条件では陽子と重陽子が入射する。陽子は高エネルギーであるため BSD の $\Delta E, E$ 検出器を通過し、重陽子は 2 層目の E 検出器で全運動エネルギーを失う。図 5.17 の横軸が約 35 ns、縦軸 90 ns のイベントは通過した陽子由来である。一方で横軸が 65 ~ 75 ns、縦軸 20 ~ 60 ns 付近の筋は重陽子由来の筋であると考えられる。図 5.18 は条件 1,2,3,4 を同時にプロットしたものである。横軸が約 50 ~ 75 ns 付近の陽子と重陽子の筋がどれだけ分離できているかを次のように評価した。

図 5.16 の陽子由来の筋を 3 次関数 $f_{fit}(\Delta E)$ でフィッティングした。このフィッティング関数 $f_{fit}(\Delta E)$ は陽子イベントに対応する。図 5.18 の各イベントの E と $f_{fit}(\Delta E)$ の差 E_{dif} を取る (式 5.11)。ただし、陽子と重陽子のイベントがある領域 (横軸 70 ~ 72 ns) のイベントを選んだ。

$$E_{dif} = E - f_{fit}(\Delta E) \quad (5.11)$$

E_{dif} の一次元ヒストグラムをガウス関数でフィッティングすることで分解能の評価を行った。図 5.19 と図 5.20 はフィッティングの結果を示している。 E_{dif} が 0 ns 付近のピークは陽子のイベントを表し、20 ns 付近のピークは重陽子のイベントを表している。また、赤線はこれらのピークをそれぞれガウス関数でフィッティングしたものである。ここで分離度 s を次のように定義する。

$$s = \frac{d}{\sigma_{ave}} \quad (5.12)$$

$$\sigma_{ave} = \frac{\sigma_p + \sigma_d}{2} \quad (5.13)$$

$$d: \text{陽子イベントと重陽子イベントのピークの間隔} \quad (5.14)$$

$$\sigma_p: \text{陽子イベントの } E_{dif} \text{ の標準偏差} \quad (5.15)$$

$$\sigma_d: \text{重陽子イベントの } E_{dif} \text{ の標準偏差} \quad (5.16)$$

$$(5.17)$$

図 5.19 の陽子イベントのピークの σ_p は 7.0 ns であり、図 5.20 の重陽子イベントのピークの σ_d は 5.8 ns であるため、 $\sigma_{ave} = \frac{7.0+5.8}{2} = 6.4$ ns である。2 つのピークの間隔 d は 23.4 ns であるため分離度 s は $s = \frac{23.4}{6.4} = 3.66$ となり、陽子と重陽子を 3.66σ 分離できた。表 5.14 に MPPC15,16,17 と MPPC72~85 の組み合わせでの陽子イベントと重陽子イベントの中心値と σ を示す。また、表 5.15 にピーク間の距離 d と分離度 s を示す。 σ の範囲はおよそ 3.6~7.0 ns であり、それぞれの組み合わせでおよそ $2.8\sim 4.7\sigma$ 分離できた。

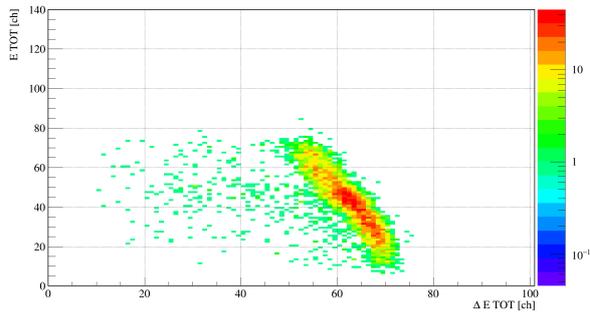


図 5.16: 条件 1,2,3 での ΔE と E の相関を表している。横軸は MPPC78(ΔE) の TOT [ns]、縦軸は MPPC16(E) の TOT [ns] を示している。横軸の約 50 ~ 70 ns にわたって見える筋は BSD 内でエネルギーを失った陽子だと考えられる。

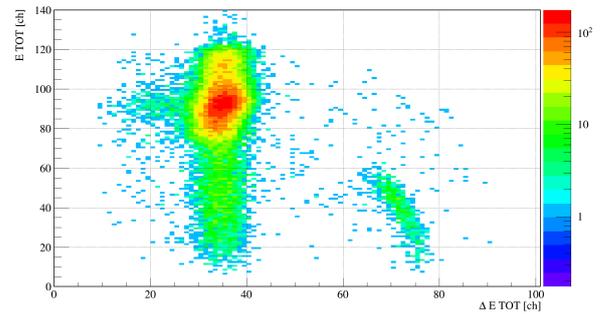


図 5.17: 条件 4 での ΔE と E の相関を表している。横軸は MPPC78(ΔE) の TOT [ns]、縦軸は MPPC16(E) の TOT [ns] を示している。横軸の約 35 ns 付近のイベントは BSD を通過した陽子だと考えられる。約 65 ~ 75 ns にわたって見える筋は BSD 内でエネルギーを失った重陽子だと考えられる。

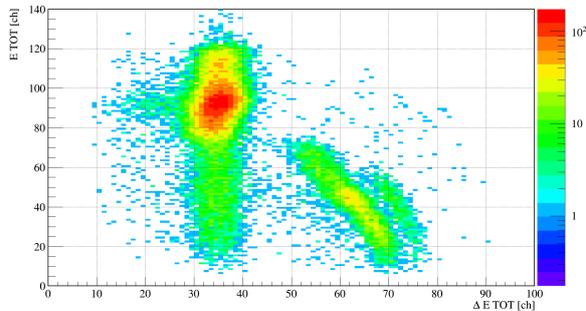


図 5.18: 条件 1,2,3,4 での ΔE と E の相関を表している。横軸は MPPC78(ΔE) の TOT [ns]、縦軸は MPPC16(E) の TOT [ns] を示している。

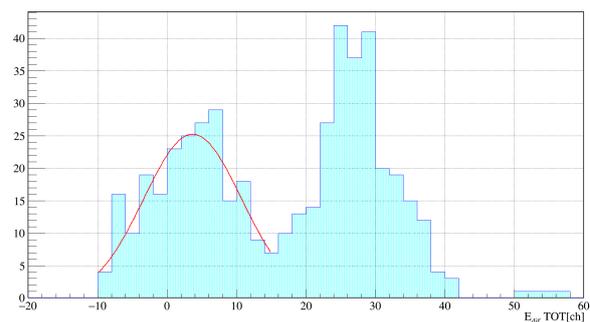


図 5.19: TOT データでの E_{dif} の一次元ヒストグラム。赤線は陽子によるイベントをガウス関数でフィッティングした結果を表している。ピークの中心は 3.5 ± 1.0 ns であり $\sigma = 7.0 \pm 1.0$ ns であった。

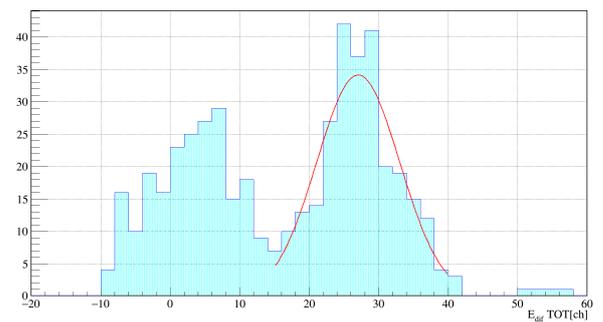


図 5.20: TOT データでの E_{dif} の一次元ヒストグラム。赤線は重陽子によるイベントをガウス関数でフィッティングした結果を表している。ピークの中心は 26.9 ± 0.5 ns であり $\sigma = 5.8 \pm 0.6$ ns であった。

表 5.14: TOT データにおける E_{dif} の分解能。 ΔE と E のそれぞれの MPPC の組み合わせに関して陽子イベントと重陽子イベントをそれぞれガウス関数でフィッティングを行い、その中心値と標準偏差を示している。括弧内の数字は誤差を表す。

MPPC ID(E)	MPPC ID(ΔE)	陽子イベントの中心値 [ns]	σ_p [ns]	重陽子イベントの中心値 [ns]	σ_d [ns]
15	72	-0.7(5)	6.2(6)	22.9(7)	5.5(5)
	73	-1.6(4)	5.6(4)	20.9(9)	5.2(8)
	74	-0.6(3)	6.0(3)	23.3(4)	5.4(4)
	75	-1.5(3)	6.5(3)	21.5(4)	4.8(3)
	76	-2.9(4)	6.2(4)	19.6(9)	4.7(9)
	77	-1.9(4)	6.7(4)	22.6(4)	4.8(3)
	78	-1.3(2)	6.2(3)	22.0(4)	4.3(3)
	79	-1.9(4)	7.2(5)	20.3(6)	5.1(4)
	80	-1.3(2)	6.2(3)	17.5(6)	3.9(4)
	81	-2.4(5)	7.6(5)	16.0(15)	4.8(7)
	82	-1.6(3)	5.9(4)	20.7(4)	3.6(4)
	83	-1.1(3)	6.0(3)	20.6(4)	3.9(3)
	84	0.4(3)	5.9(3)	24.3(4)	5.0(4)
	85	-1.9(3)	6.4(4)	20.4(4)	4.1(4)
	16	72	-1.1(5)	5.8(5)	20.0(18)
73		-1.7(5)	6.6(6)	19.9(9)	4.9(8)
74		-2.2(4)	6.6(5)	22.3(4)	5.0(4)
75		-1.5(3)	6.6(4)	21.2(4)	5.0(3)
76		-0.1(2)	6.2(3)	22.5(5)	4.6(4)
77		-1.9(3)	6.0(3)	21.3(3)	4.6(3)
78		3.5(10)	7.0(10)	26.9(5)	5.8(6)
79		-1.7(4)	6.9(5)	20.9(5)	5.0(3)
80		-1.3(2)	6.0(2)	17.6(7)	5.1(5)
81		-1.7(4)	7.3(4)	19.4(8)	5.3(4)
82		-1.1(2)	5.4(2)	22.5(3)	5.2(3)
83		-1.1(2)	5.8(2)	21.2(3)	4.8(3)
84		-1.3(2)	5.8(2)	22.2(3)	4.7(3)
85		-1.8(2)	6.4(3)	20.9(4)	4.9(4)
17		72	-0.8(5)	5.0(5)	18.0(13)
	73	-1.2(6)	5.9(6)	16.7(24)	4.7(24)
	74	-1.8(4)	6.1(5)	18.7(5)	4.1(4)
	75	-1.8(4)	6.2(4)	18.5(3)	3.8(3)
	76	-1.3(2)	5.5(2)	19.3(6)	3.8(6)
	77	-1.5(3)	6.1(3)	19.2(4)	4.3(3)

次のページへ続く。

MPPC ID(E)	MPPC ID(ΔE)	陽子イベントの中心値 [ns]	σ_p [ns]	重陽子イベントの中心値 [ns]	σ_d [ns]
17	78	-1.7(2)	6.0(3)	19.0(6)	3.8(6)
	79	-1.2(3)	6.0(3)	20.1(3)	4.5(4)
	80	0.3(2)	6.1(2)	20.1(5)	5.2(5)
	81	-2.0(3)	7.5(4)	17.0(9)	6.3(6)
	82	-0.9(2)	5.7(3)	24.0(4)	5.3(4)
	83	-1.0(2)	6.5(3)	22.4(3)	5.7(3)
	84	0.5(4)	6.7(5)	27.3(8)	7.5(10)
	85	-1.2(2)	6.8(3)	22.7(4)	6.8(5)

表終了

表 5.15: TOT データにおける E_{dif} の分解能。表 5.14 の陽子イベントと重陽子イベントの中心値の間隔 d と、それぞれの標準偏差の平均値 σ_{ave} および分離度 s を示す。

MPPC ID(E)	MPPC ID(ΔE)	p と d のピーク間の距離 d [ns]	σ_{ave} [ns]	分離度 s
15	72	23.6	5.85	4.03
	73	22.5	5.40	4.17
	74	23.9	5.70	4.19
	75	23.0	5.70	4.04
	76	22.5	5.45	4.13
	77	24.5	5.75	4.26
	78	23.3	5.25	4.44
	79	22.2	6.15	3.61
	80	18.8	5.05	3.72
	81	18.4	6.20	2.97
	82	22.3	4.75	4.69
	83	21.7	4.50	4.38
	84	23.9	5.45	4.39
	85	22.3	5.25	4.25
16	72	21.1	6.25	3.38
	73	21.6	5.75	3.76
	74	24.5	5.80	4.22
	75	22.7	5.80	3.91
	76	22.6	5.40	4.19
	77	23.2	5.30	4.38
	78	23.4	6.40	3.66
	79	22.3	5.95	3.75
80	18.9	5.55	3.41	
81	21.1	6.30	3.35	

次のページへ続く。

MPPC ID(E)	MPPC ID(ΔE)	p と d のピーク間の距離 d [ns]	σ_{ave} [ns]	分離度 s
	82	23.6	5.30	4.45
	83	22.3	5.30	4.21
	84	23.5	5.25	4.48
	85	22.7	5.65	4.02
17	72	18.8	5.05	3.72
	73	17.9	5.30	3.38
	74	20.5	5.10	4.02
	75	20.3	5.00	4.06
	76	20.6	4.65	4.43
	77	20.7	5.20	3.98
	78	20.7	4.90	4.22
	79	21.3	5.25	4.06
	80	19.8	5.65	3.50
	81	19.0	6.90	2.75
	82	24.9	5.50	4.53
	83	23.4	6.10	3.84
	84	26.8	7.10	3.77
	85	23.9	6.80	3.51

表終了

入射粒子の位置による補正

図 5.21 は BSD を上面から見た図を表している。ただし E 検出器に関して鉛直方向の上から 6 番目のシンチレータと MPPC を示している。図中の番号は MPPC の ID を表している。ただし ΔE 検出器に関して上側の MPPC の ID のみを表し、また、ID74,76,80,82 は省略している。図 5.22 は条件 1 における MPPC72 の TOT_{cor} の分布を表し、赤線はガウス関数でフィッティングした結果を示している。MPPC73~85 にも同様にフィッティングを行った。各シンチレータに入射する陽子のエネルギー損失が等しいと仮定して、フィッティングの結果より各 MPPC のゲインが MPPC78 に等しくなるように TOT_{cor} に定数 $a_k (k = 72 \sim 85)$ をかけた (式 5.18)。表 5.16 に各 MPPC でのフィッティングの結果と、ゲイン調整のためにかけた定数を示す。定数をかけ補正した TOT_{cor} を TOT'_{cor} とする。

$$TOT'_{cor} = a_k \times TOT_{cor} \quad (5.18)$$

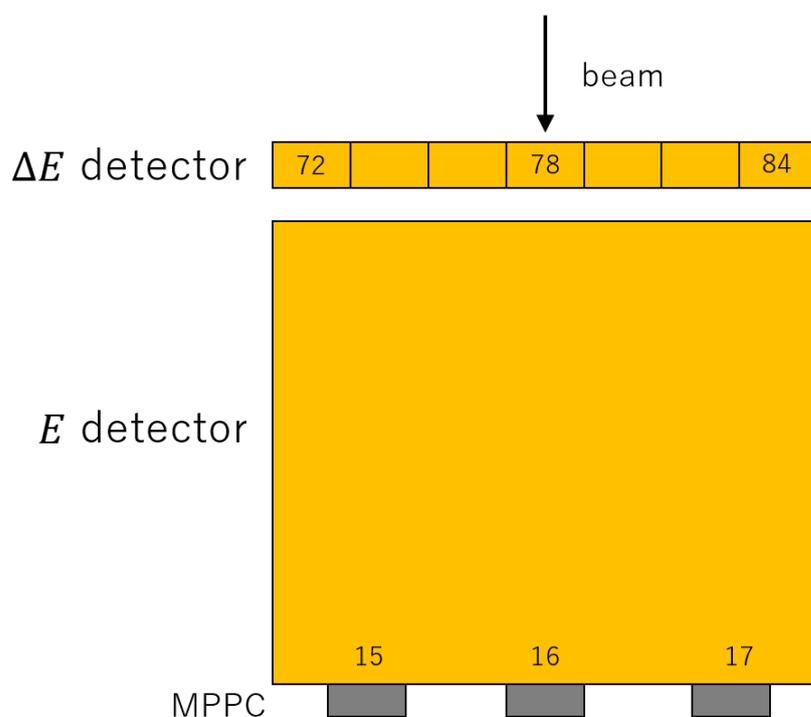


図 5.21: BSD を上面から見た図。番号は MPPC の ID を表している。

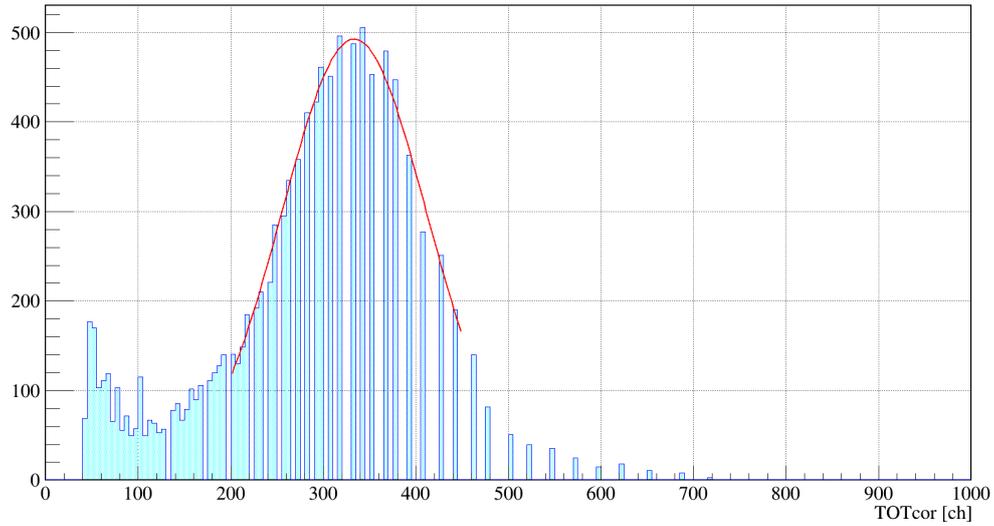


図 5.22: 条件 1 における MPPC72 の TOT_{cor} 。赤線はガウス関数でフィッティングした結果を示す。ピークの中心値は 334.7 ± 1.7 ch であり $\sigma = 88.6 \pm 1.58$ ch であった。イベントが離散的になっているのは NIM-EASIROC の TDC の分解能が TOT_{cor} のビン幅より大きいためである。

表 5.16: 条件 1 における各 MPPC のフィッティング結果と補正のための定数 a_k

MPPC ID	フィッティングの中心値 [ch]	a_k
72	334.7(17)	1.004
73	300.8(9)	1.117
74	310.1(8)	1.084
75	261.8(6)	1.398
76	368.7(26)	0.9113
77	331.9(14)	1.103
78	336.0(15)	1.000
79	276.7(7)	1.214
80	309.4(11)	1.086
81	174.8(4)	1.922
82	262.7(10)	1.279
83	282.4(6)	1.296
84	300.4(9)	1.119
85	320.6(11)	1.142

図 5.23,5.24,5.25 は条件 4 において、MPPC72,74,76,78,80,82,84 でゲートをかかけた時の MPPC15,16,17 の TOT の分布を示している。粒子の入射位置が E 検出器の MPPC に近いほど TOT が大きくなるのがわかる。これは粒子の入射位置に近いほど MPPC の集光効率が大きいことが原因と考えられる。 E 検出器の各 MPPC から出力される信号の波高が粒子の入射位置に依存しないように以下の補正を行った。

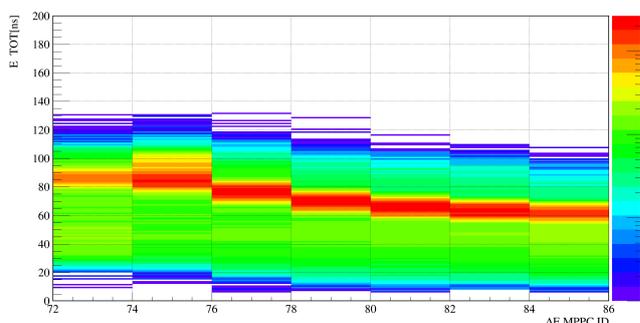


図 5.23: 条件 4 における、MPPC72,74,76,78,80,82,84 でゲートをかかけた時の MPPC15 の TOT の分布。横軸はゲートをかける ΔE 検出器の MPPC の ID、縦軸は MPPC15 で測定した TOT [ns] を示す。

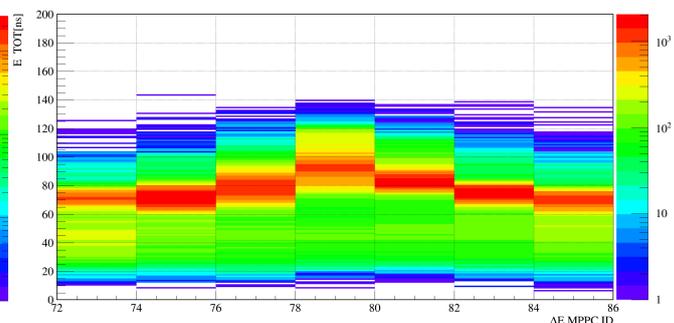


図 5.24: 条件 4 における、MPPC72,74,76,78,80,82,84 でゲートをかかけた時の MPPC16 の TOT の分布。横軸はゲートをかける ΔE 検出器の MPPC の ID、縦軸は MPPC16 で測定した TOT [ns] を示す。

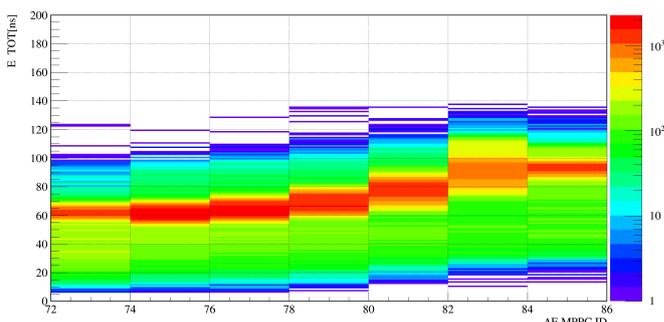


図 5.25: 条件 4 における、MPPC72,74,76,78,80,82,84 でゲートをかかけた時の MPPC17 の TOT の分布。横軸はゲートをかける ΔE 検出器の MPPC の ID、縦軸は MPPC17 で測定した TOT [ns] を示す。

図 5.26 は条件 3 における、MPPC78 でゲートをかかけた時の MPPC16 の TOT_{cor} を示している。このヒストグラムの平均値をほかの ΔE の MPPC の組み合わせでのヒストグラムの平均値で割り、その値を $b_{l,m}$ ($l = 15, 16, 17, m = 72, 74, 76, 78, 80, 82, 84$) とする。ここで l は E 検出器の MPPC の ID、 m をゲート条件の ΔE 検出器の MPPC の ID とする。ほかの MPPC との組み合わせでの TOT_{cor} の平均値が図 5.26 のヒストグラムの平均値と等しくなるように定数 $b_{l,m}$ をかける (式 5.19)。この操作をすることで入射粒子の位置によらず、 E 検出器の各 MPPC から出力される信号の波高は等しくなる。表 5.17 に定数 $b_{l,m}$ の値を示す。

$$TOT'_{cor} = b_{l,m} \times TOT_{cor} \quad (5.19)$$

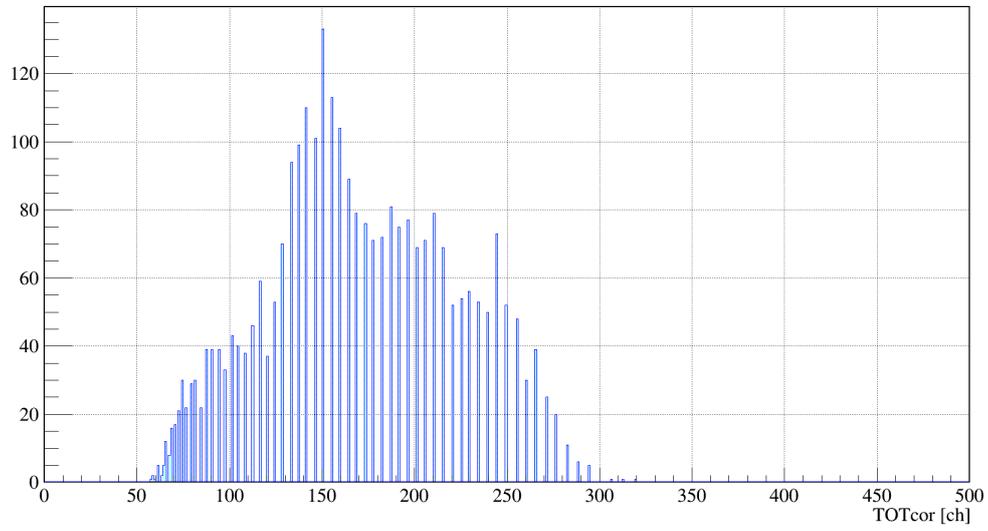


図 5.26: 条件 3 における MPPC78 でゲートをかけた時の MPPC16 の TOT_{cor} 。横軸は TOT_{cor} [ch]、縦軸はカウント数を示している。イベントの平均値は 166.5 ch であった。

表 5.17: 入射位置依存性を補正するための定数 $b_{l,m}$

l	m	$b_{l,m}$
15	72	1.137
	74	1.099
	76	1.153
	78	1.214
	80	1.286
	82	1.327
	84	1.376
16	72	1.140
	74	1.089
	76	1.051
	78	1.000
	80	0.9934
	82	0.9976
	84	1.024
17	72	1.599
	74	1.476
	76	1.340
	78	1.173
	80	1.012
	82	0.8852
	84	0.8379

TOT を用いて粒子識別をした時と同様に TOT'_{cor} を用いて粒子識別を行った。まず、 ΔE 検出器の 7 本のシンチレータと E 検出器の 1 個のシンチレータを用いて陽子と重陽子をどれだけ分離できるか評価した。図 5.27 は条件 1,2,3 で測定したデータを同時にプロットしており、横軸は MPPC72~85(ΔE) の TOT'_{cor} [ch] の平均値を示し、縦軸は MPPC15,16,17(E) の TOT'_{cor} [ch] の平均値を示している。また、図 5.28 は条件 1,2,3,4 で測定したデータを同時にプロットを示している。TOT で評価したときと同様に図 5.27 の二次元ヒストグラムを 3 次関数でフィッティングし、このフィッティング関数 $f_{fit}(\Delta E)$ と測定された E との差 E_{dif} を、図 5.28 の横軸が 300 ~ 350 ch のそれぞれのイベントについて求めた (式 5.11)。図 5.29,5.30 は E_{dif} の分布を表している。図 5.29 は陽子によるイベントをガウス関数でフィッティングした結果を示しており、図 5.30 は重陽子によるイベントをガウス関数でフィッティングした結果を示している。陽子イベントのピークの中心値は -2.6 ch、 σ_p は 12.2 ch であり、重陽子イベントのピークの中心値は 81.3 ch、 σ_d は 21.0 ch だった。ピーク間の距離 d は 83.9 ch であり、式 5.13 より $\sigma_{ave} = \frac{12.2+21.0}{2} = 16.6$ ch である。式 5.12 より分離度 s は $s = \frac{83.9}{16.6} = 5.02$ となり、陽子と重陽子は 5.02σ 分離できた。

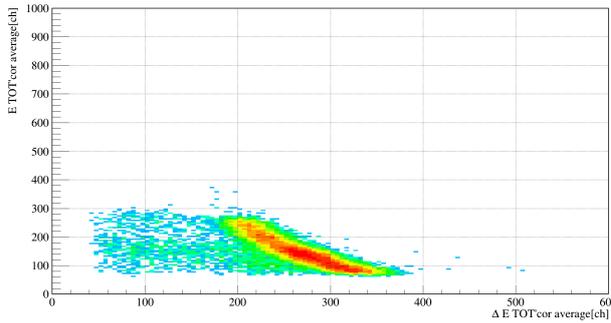


図 5.27: 条件 1,2,3 での ΔE と E の相関を表している。横軸は MPPC72~85(ΔE) の TOT'_{cor} [ch] の平均値、縦軸は MPPC15,16,17(E) の TOT'_{cor} [ch] の平均値を示している。

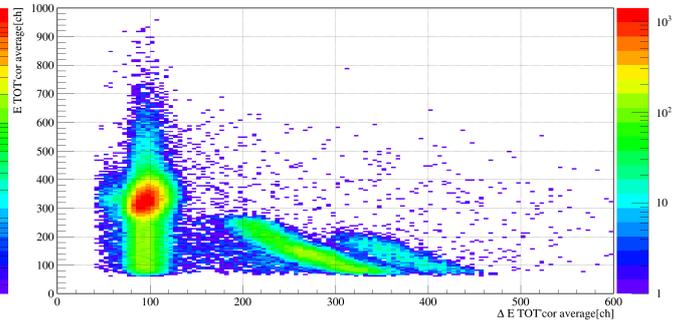


図 5.28: 条件 1,2,3,4 での ΔE と E の相関を表している。横軸は MPPC72~85(ΔE) の TOT'_{cor} [ch] の平均値、縦軸は MPPC15,16,17(E) の TOT'_{cor} [ch] の平均値を示している。

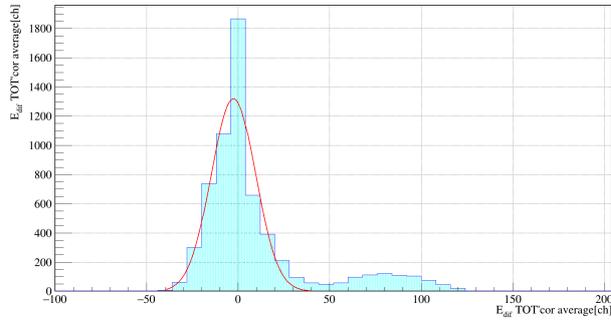


図 5.29: TOT'_{cor} での E_{dif} の一次元ヒストグラム。赤線は陽子によるイベントをガウス関数でフィッティングした結果を表している。中心値は -2.6 ± 0.2 ch、 σ_p は $12.2 \sim 2$ ch であった。

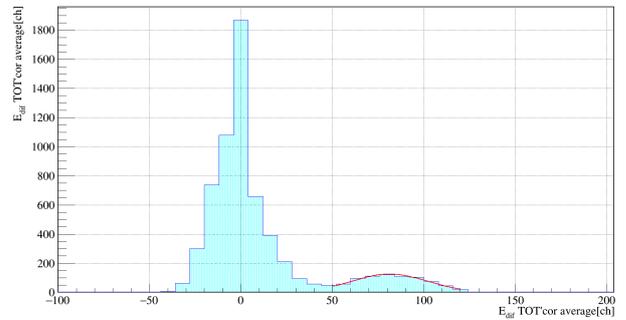


図 5.30: TOT'_{cor} での E_{dif} の一次元ヒストグラム。赤線は重陽子によるイベントをガウス関数でフィッティングした結果を表している。中心値は 81.3 ± 1.1 ch、 σ_d は 21.0 ± 1.0 ch であった。

次に ΔE 検出器の 1 本のシンチレータと E 検出器の 1 個のシンチレータを用いて陽子と重陽子をどれだけ分離できるか評価した。図 5.31 は条件 1,2,3 で測定したデータを同時にプロットしており、横軸は MPPC78,79(ΔE) の TOT'_{cor} [ch] の平均値を示し、縦軸は MPPC15,16,17(E) の TOT'_{cor} [ch] の平均値を示している。また、図 5.32 は条件 1,2,3,4 で測定したデータを同時にプロットを示している。図 5.31 の二次元ヒストグラムを 3 次関数でフィッティングし、フィッティング関数 $f_{fit}(\Delta E)$ と測定された E との差 E_{dif} を図 5.32 の横軸が 300 ~ 350 ch のイベントについて求めた (式 5.11)。図 5.33,5.34 は E_{dif} の分布を表している。図 5.33 は陽子によるイベントをガウス関数でフィッティングした結果を示しており、図 5.34 は重陽子によるイベントをガウス関数でフィッティングした結果を示している。陽子イベントのピークの中心値は -2.3 ch、 σ_p は 10.4 ch であり、重陽子イベントのピークの中心値は 85.7 ch、 σ_d は 20.3 ch だった。ピーク間の距離 d は 88.0 ch であり、式 5.13,5.12 に従うと $\sigma_{ave} = \frac{10.4+20.3}{2} = 15.35$ ch、 $s = \frac{88.0}{15.35} = 5.73$ となり 5.73σ 分離できた。表 5.18 に ΔE 検出器の各シンチレータと E 検出器の 1 個のシンチレータの組み合わせでの陽子イベントと重陽子イベントの中心値と σ を示す。また、表 5.19 にピーク間の距離 d と σ_{ave} および分離度 s を示す。 σ の範囲はおよそ $8.0 \sim 13.8$ ch であり、それぞれの組み合わせでおよそ $5.3 \sim 7.4\sigma$ 分離できた。表 5.15 と比較して分解能が向上したことが示された。 ΔE をシンチレータごとに分けない場合の分離度 ($s = 5.02$) と比べて分離度が大きいのは、 ΔE の入射位置依存性の補正の精度が原因と考えられる。補正の精度がより良

い場合には個々のシンチレータと比較して分離度は等しくなると考えられる。

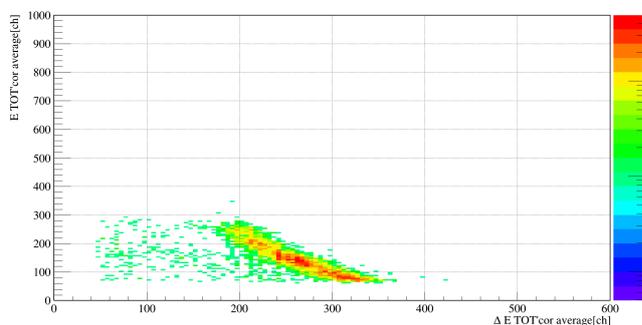


図 5.31: 条件 1,2,3 での ΔE と E の相関を表している。横軸は MPPC78,79(ΔE) の TOT'_{cor} [ch] の平均値、縦軸は MPPC15,16,17(E) の TOT'_{cor} [ch] の平均値を示している。

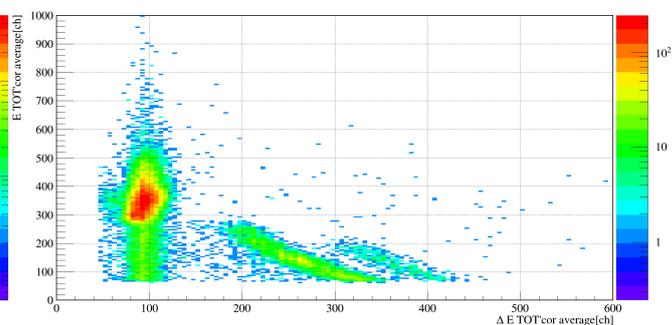


図 5.32: 条件 1,2,3,4 での ΔE と E の相関を表している。横軸は MPPC78,79(ΔE) の TOT'_{cor} [ch] の平均値、縦軸は MPPC15,16,17(E) の TOT'_{cor} [ch] の平均値を示している。

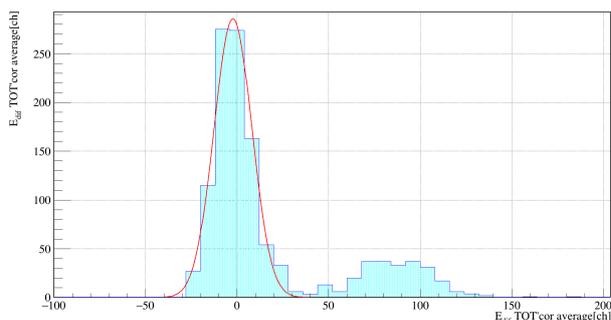


図 5.33: TOT'_{cor} での E_{dif} の一次元ヒストグラム。赤線は陽子によるイベントをガウス関数でフィッティングした結果を表している。中心値は -2.3 ± 0.4 ch、 σ_p は $10.4 \sim 3$ ch であった。

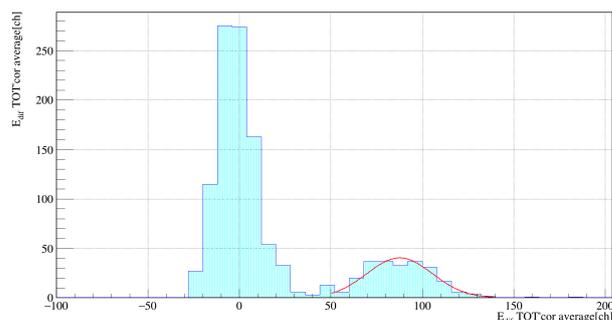


図 5.34: TOT'_{cor} での E_{dif} の一次元ヒストグラム。赤線は重陽子によるイベントをガウス関数でフィッティングした結果を表している。中心値は 85.7 ± 1.4 ch、 σ_d は 20.3 ± 1.2 ch であった。

表 5.18: TOT'_{cor} での E_{dif} の分解能。 ΔE と E のそれぞれの MPPC の組み合わせに関して陽子イベントと重陽子イベントをそれぞれガウス関数でフィッティングを行い、その中心値と標準偏差を示している。括弧内の数字は誤差を表す。

シンチレータ ID(ΔE)	MPPC ID(ΔE)	陽子イベントの中心値 [ch]	σ_p [ch]	重陽子イベントの中心値 [ch]	σ_d [ch]
24	72,73	-0.5(9)	8.0(8)	86.3(40)	17.8(29)
25	74,75	-0.8(5)	10.8(3)	79.5(23)	20.5(20)
26	76,77	-1.7(5)	9.5(6)	91.2(20)	15.6(15)
27	78,79	-2.3(4)	10.4(3)	85.7(14)	20.3(12)
28	80,81	-2.3(4)	11.5(3)	78.0(19)	18.6(16)
29	82,83	0.7(3)	13.8(3)	88.7(13)	17.8(10)
30	84,85	-1.3(5)	10.2(3)	95.4(14)	17.0(13)

表 5.19: TOT_{cor}'での E_{dif} の分解能。表 5.14 の陽子イベントと重陽子イベントの中心値の間隔 d と、 σ_{ave} および分離度 s を示す。

シンチレータ ID(ΔE)	MPPC ID(ΔE)	p と d のピーク間の距離 d [ch]	σ_{ave} [ch]	分離度 s
24	72,73	86.8	12.90	6.73
25	74,75	80.3	15.65	5.13
26	76,77	92.9	12.55	7.40
27	78,79	88.0	15.35	5.73
28	80,81	80.3	15.05	5.34
29	82,83	88.0	15.80	5.57
30	84,85	96.7	13.60	7.11

貫通した粒子への応答

図 5.35,5.36,5.37 は条件 1,2,3,4 のデータのプロットを示している。横軸は MPPC16 の TOT [ns]、縦軸は MPPC15 の TOT [ns] を示し、それぞれ MPPC74,78,84 でゲートをかけている。図 5.37 に示すように E 検出器の MPPC からは遠い ΔE のシンチレータでゲートをかけた場合は出力される信号の波高は互いに比例し、図のように 1 対 1 の対応となる。一方で E 検出器の MPPC に近い ΔE のシンチレータでゲートをかけた場合には単純な 1 対 1 の対応関係から外れるイベントが見られる。図 5.35 では MPPC15 に近い ΔE のシンチレータでゲートをかけているが、MPPC15 からの出力される信号は MPPC16 よりも大きくなる (縦軸 80~100 ns 付近)。同様に図 5.36 に示すように MPPC16 に近い ΔE のシンチレータでゲートをかけた場合には MPPC16 の出力信号は MPPC15 に比べて大きい (横軸 80~100 ns 付近)。同様に図 5.38,5.39,5.40 は条件 1,2,3,4 のデータのプロットを示している。ただし、それぞれ ΔE 検出器の MPPC で TOT が 45 ns 以上のイベントを選択することで BSD を貫通するイベントを除去している。これらの図では MPPC15,16 の出力は比例関係になっている。このことより、MPPC のすぐ近くでシンチレーション光が発生した場合には TOT の値が大きくなるイベントが現れていると考えられる。本実験では BSD 内で運動エネルギーをすべて失う重陽子の検出を目的としている。先述したようにシンチレーション光の発生位置が MPPC から遠くない場合には TOT の値は大きくならない。 $\Delta E - E$ プロットを作成し粒子識別をする際に ΔE 検出器の 1 本のシンチレータでゲートをかけ、さらにそのシンチレータから離れた E 検出器の MPPC を用いることで MPPC の出力が通常通りの $\Delta E - E$ プロットを作成することができる。その $\Delta E - E$ プロットを用いることで粒子識別は可能だと考えられる。重陽子のエネルギーを測定する際に、MPPC の近くで全運動エネルギーを失うイベントもあると考えられる。後述するキャリブレーションの方法では高エネルギーの重陽子を用いる。実際に高エネルギーの重陽子を検出した際に MPPC 同士の出力の対応関係を見て、1 対 1 の対応関係ではないイベントがある場合には新たに補正する必要がある。

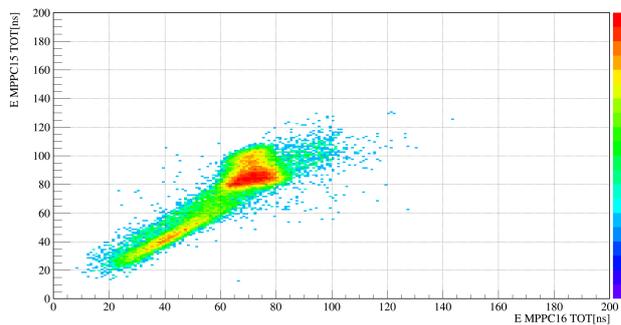


図 5.35: 条件 1,2,3,4 における MPPC74 でゲートをか
けた時の MPPC16 と MPPC15 の TOT の相関。横
軸は MPPC16 の TOT [ns]、縦軸は MPPC15 の
TOT [ns] を示す。

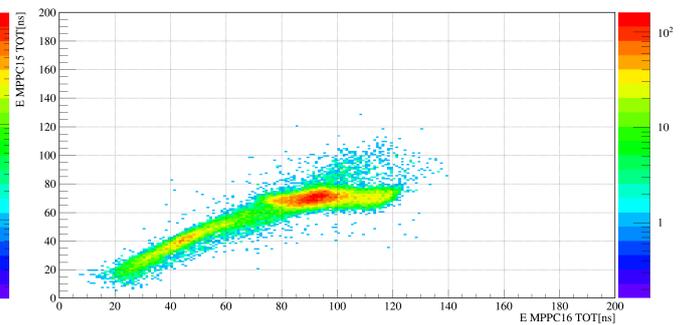


図 5.36: 条件 1,2,3,4 における MPPC78 でゲートをか
けた時の MPPC16 と MPPC15 の TOT の相関。横
軸は MPPC16 の TOT [ns]、縦軸は MPPC15 の
TOT [ns] を示す。

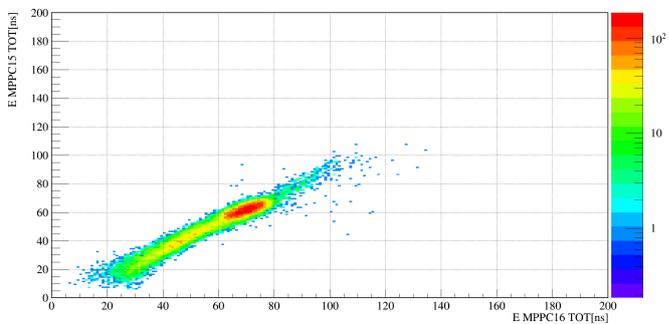


図 5.37: 条件 1,2,3,4 における MPPC84 でゲートをか
けた時の MPPC16 と MPPC15 の TOT の相関。横
軸は MPPC16 の TOT [ns]、縦軸は MPPC15 の
TOT [ns] を示す。

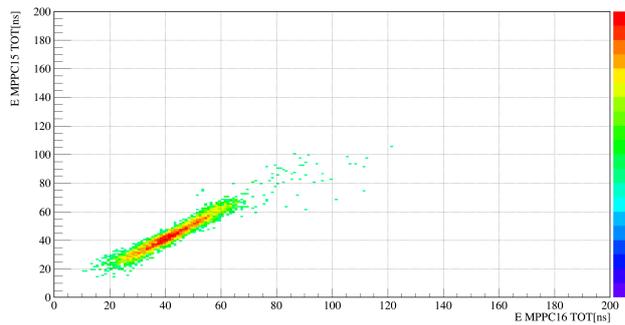


図 5.38: 条件 1,2,3,4 における MPPC74 でゲートをか
けた時の MPPC16 と MPPC15 の TOT の相関。
MPPC74 の TOT が 45 ns 以上のイベントのみ
をプロットしている。横軸は MPPC16 の TOT
[ns]、縦軸は MPPC15 の TOT [ns] を示す。

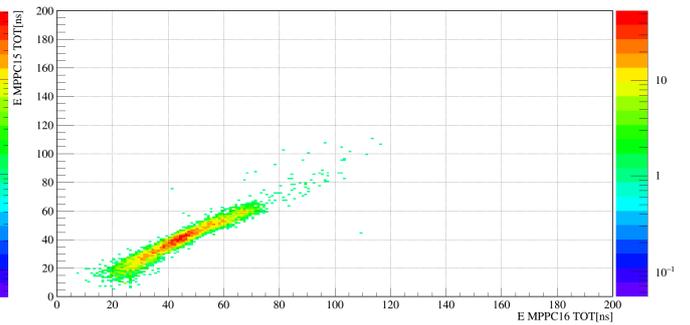


図 5.39: 条件 1,2,3,4 における MPPC78 でゲートをか
けた時の MPPC16 と MPPC15 の TOT の相関。
MPPC78 の TOT が 45 ns 以上のイベントのみ
をプロットしている。横軸は MPPC16 の TOT
[ns]、縦軸は MPPC15 の TOT [ns] を示す。

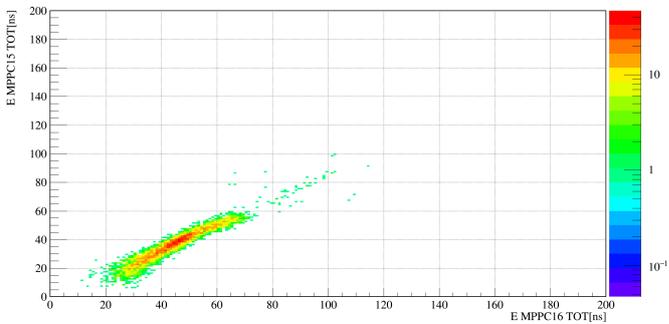


図 5.40: 条件 1,2,3,4 における MPPC84 でゲートをか
けた時の MPPC16 と MPPC15 の TOT の相関。
MPPC84 の TOT が 45 ns 以上のイベントのみ
をプロットしている。横軸は MPPC16 の TOT
[ns]、縦軸は MPPC15 の TOT [ns] を示す。

第6章

まとめと今後の展望

6.1 まとめ

我々は理化学研究所 RIBF で $^{10}\text{Be}(p, pd)^8\text{Li}$ 反応を用いた不安定核中の短距離相関対 (SRC pair: Short Range Correlation pair) 探索実験を予定している。本研究では探索実験で使用する重陽子検出器 BSD (Backward Scattering deuteron Detector) の開発と性能評価実験を行った。実験では前方散乱および後方散乱する陽子・重陽子の散乱角度とエネルギーを測定することで三重微分断面積 $d^3\sigma/d\Omega_p d\Omega_d dT_d$ を導出する。また、残留核 ^8Li の第一励起状態から放出されるガンマ線や第三励起状態から放出される中性子を検出し ^8Li の終状態を特定することで SRC ペアのスピンの S とアイソスピン T の同定を行う。

BSD の開発ではペDESTAL測定を行い、宇宙線を測定することで各 MPPC のゲイン調整と TOT と ADC の対応関係を測定した。宇宙線を測定した際には得られた二次元ヒストグラムをフィッティングすることで TOT の非線形性を補正する式を求めた (TOT_{cor})。また、大阪大学核物理研究センター (RCNP) では陽子ビームを用いた性能評価実験を行った。TOT を用いた $\Delta E - E$ プロットより陽子と重陽子の識別を行い、それぞれのピークをガウス関数でフィッティングした結果、約 4σ で分離することができた。さらに、入射粒子の位置によって MPPC の出力信号の大きさが異なることが判明した。 TOT_{cor} に粒子の入射位置に応じた値をかけることで補正を行い再び $\Delta E - E$ プロットを作成した結果、陽子と重陽子を約 6σ で分離することができた。

6.2 今後の課題と展望

本研究では宇宙線を測定することでゲインの調整や ADC と TOT の対応関係から TOT の非線形性の補正を行った。RCNP での評価実験では TOT のデータを解析することで粒子識別や、入射粒子の位置依存性の補正を行った。現状では高エネルギーの粒子を測定したときの ADC のデータは取得していない。今後の課題は高エネルギーの粒子を測定することで ADC の精度の良いキャリブレーションを行うとともに、ADC と TOT の対応関係が宇宙線を測定した場合と異なる場合を想定して再度測定する必要がある。また、入射粒子の位置依存性についても精度よく補正することが期待される。本実験では最大約 100 MeV の重陽子のエネルギーを測定するため、重陽子を利用したエネルギー較正が必要となる。

6.2.1 重陽子ビームを利用したキャリブレーション

本実験では一次ビームである 250 MeV/u の ^{18}O を ^9Be に入射し二次ビーム ^{10}Be を生成する。一次ビームの強度は 200 pA である。ここでは同じ一次ビーム、一次標的を用いて重陽子の二次ビームを生成し、BSD のエネルギー較正を行うことを考える。ビームの収量や標的での散乱角度は LISE++[34] を用いて計算した。BSD で測定する重陽子のエネルギーの最大値は約 50 MeV/u であるため、エネルギー較正には 50 MeV/u の重陽子を用いる。50 MeV/u の重陽子を分離した際には約 86 MeV/u の ^3He も液体水素標的に入射する。図 6.1 は 50 MeV/u の重陽子を分離した際の液体水素標的で散乱する粒子の収量を示している [34]。液体水素標的の下流のそれぞれの強度は約 4.0×10^5 [s] と 6.0×10^4 [s] である。図 6.2,6.3 は 50 MeV/u の重陽子と 86 MeV/u の ^3He が液体水素標的と弾性散乱した際の散乱角度とエネルギーの関係を示している [34]。黄帯は BSD が覆っている角度の範囲を示している。図 6.2 の場合は 86 MeV/u の陽子と 50 MeV/u および 7 MeV/u の重陽子が BSD に入射する。図 6.3 の場合は 190 MeV/u の陽子と 82 MeV/u および 65 MeV/u の ^3He が BSD に入射する。それぞれの粒子が BSD 入射した際の ΔE 検出器と E 検出器でのエネルギー損失を表 6.1,6.2 に示す。

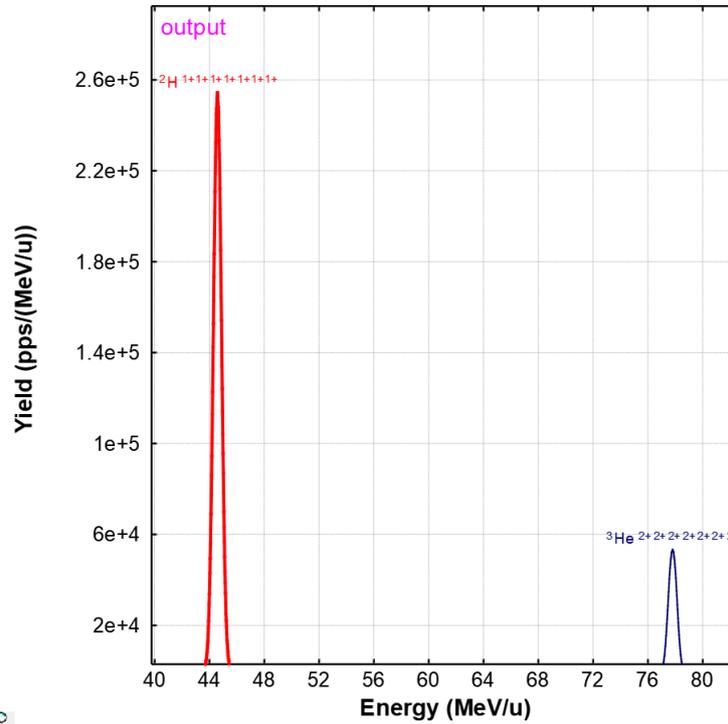


図 6.1: BigRIPS で 50 MeV/u の重陽子を分離した際の液体水素標的に入射する粒子の収量 [34]。横軸は粒子の 1 核子あたりのエネルギー [MeV/u]、縦軸は収量 [pps/(MeV/u)] を示す。赤色は重陽子イベントを表し、青色は ^3He イベントを表す。

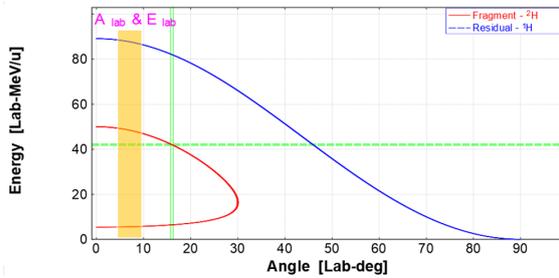


図 6.2: $p + d$ 弾性散乱での散乱角度とエネルギー。横軸は実験室系での散乱角度 $[\text{deg}]$ 、縦軸は散乱後の粒子のエネルギー [MeV/u] を示している。赤線は重陽子、青線は陽子、黄帯は BSD が覆っている角度の範囲を示している。

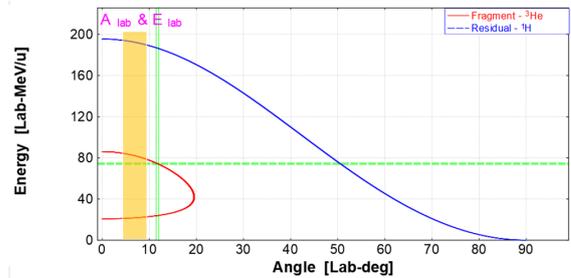


図 6.3: $p + ^3\text{He}$ 弾性散乱での散乱角度とエネルギー。横軸は実験室系での散乱角度 $[\text{deg}]$ 、縦軸は散乱後の粒子のエネルギー [MeV/u] を示している。赤線は ^3He 、青線は陽子、黄帯は BSD が覆っている角度の範囲を示している。

重心系での散乱角度と微分断面積を表 6.3, 6.4 に示す。ただし微分断面積は 70 MeV/u の重陽子ビームのデータ [35] および 65 MeV/u の ^3He ビームのデータ [36] を採用しており、実験室系で 6.5° に散乱するものを選択している。散乱角度は 50 MeV/u の重陽子ビームと 86 MeV/u の He ビームから計算している。

微分断面積は重心系での値なので、立体角を重心系に変換、または微分断面積を実験室系に変換する必要がある。ここでは立体角を重心系に変換することを考える。入射粒子の質量を m_1 、標的粒子の質量を m_2 、実験室系での散乱角度をそれぞれ θ 、 ϕ 、重心系での散乱角度を θ_{cm} としたとき、入射粒子の実験室系での立体

表 6.1: $p + d$ 弾性散乱における散乱粒子の BSD でのエネルギー損失

	ΔE [MeV]	E [MeV]
陽子 [86 MeV/u]	5	81
重陽子 [50 MeV/u]	8	89
重陽子 [7 MeV/u]	13	到達しない

表 6.2: $p + {}^3\text{He}$ 弾性散乱における散乱粒子の BSD でのエネルギー損失

	ΔE [MeV]	E [MeV]
陽子 [190 MeV/u]	3	30
${}^3\text{He}$ [82 MeV/u]	22	226
${}^3\text{He}$ [21 MeV/u]	65	到達しない

表 6.3: $p + d$ 弾性散乱において BSD に入射する粒子の重心系での散乱角度と微分断面積

	θ_{cm} [°]	$d\sigma/d\Omega(\theta_{cm})$ [mb/sr]
陽子 [86 MeV/u]	166	5.26
重陽子 [50 MeV/u]	19.5	約 26
重陽子 [7 MeV/u]	173	7.2

表 6.4: $p + {}^3\text{He}$ 弾性散乱において BSD に入射する粒子の重心系での散乱角度と微分断面積

	θ_{cm} [°]	$d\sigma/d\Omega(\theta_{cm})$ [mb/sr]
陽子 [190 MeV/u]	166	1.36
${}^3\text{He}$ [82 MeV/u]	26.6	48.2
${}^3\text{He}$ [21 MeV/u]	167	1.36

角に対する重心系での立体角は

$$d\Omega(\theta_{cm}) = \frac{(\gamma \cos \theta \pm \sqrt{1 - \gamma^2 \sin^2 \theta})^2}{\sqrt{1 - \gamma^2 \sin^2 \theta}} d\Omega(\theta) \quad (6.1)$$

となる。式 6.1 の + は前方散乱、- は後方散乱の場合を表し、 $\gamma = \frac{m_1}{m_2}$ である。また、標的粒子の実験室系での立体角に対する重心系での立体角は

$$d\Omega(\theta_{cm}) = 4 \cos \phi d\Omega(\theta) \quad (6.2)$$

となる。これらの式を踏まえて BSD に入射する粒子の計数率を見積もる。例として BSD に入射する重陽子の計数率を計算する。ビーム強度 $I = 4.0 \times 10^5$ [/s]、液体水素標的の面密度 $n = 6.4 \times 10^{22}$ [/cm²]、標的から見た BSD のセグメントあたりの立体角 $\Delta\Omega(\theta) = 3.1 \times 10^{-4}$ [sr]。式 6.1 より重心系と実験室系の立体角の比は 9.0 である。BSD に入射する重陽子の散乱角度は重心系でおよそ 20° であり、この時の微分断面積 $\frac{d\sigma}{d\Omega(\theta_{cm})} = 26$ [mb/sr] = 2.6×10^{-26} [cm²/sr] である。したがって計数率は

$$4.0 \times 10^5 \times 6.4 \times 10^{22} \times 3.1 \times 10^{-4} \times 9.0 \times 2.6 \times 10^{-26} = 1.9 \text{ [/s]} \quad (6.3)$$

となる。このようにそれぞれの粒子について計数率を計算すると

表 6.5: BSD に入射する粒子の計数率

	セグメントあたりの計数率 [/s]
陽子 [86 MeV/u]	0.17
重陽子 [50 MeV/u]	1.9
重陽子 [7 MeV/u]	6.0×10^{-2}
陽子 [190 MeV/u]	6.4×10^{-3}
^3He [82 MeV/u]	0.93
^3He [21 MeV/u]	7.1×10^{-3}

これらは実際に液体水素標的に入射する粒子とは異なるエネルギーにおける散乱の微分断面積の実験値を用いて計算している。入射粒子のエネルギーが大きいくほど断面積は小さくなるため実際には $p + d$ に関して計数率は計算結果より大きく、 $p + ^3\text{He}$ に関しては小さくなると考えられる。

6.2.2 展望

本実験では BSD を用いて $^{10}\text{Be}(p, pd)^8\text{Li}$ 反応において後方散乱した重陽子の散乱角度とエネルギーを測定する。また、FSD と CATANA で前方散乱する陽子と重陽子のエネルギー、NINJA で BSD では測定できない後方散乱重陽子のエネルギーと散乱角度、PDC1,2 と HODP で後方散乱陽子のエネルギーを測定することで三重微分断面積 $d^3\sigma/d\Omega_p d\Omega_d dT_d$ を導出し、不安定核である ^{10}Be 中の SRC について知見を得る。不安定核中の SRC ペアの観測ははまだされていないため、観測に成功すれば世界初となる。さらに、より幅広い N/Z の不安定核について SRC ペアの観測をすることで様々な未解明問題の解決につながることを期待される。

付録 A

A.1 各 EASIROC と検出器の ID の組み合わせ

表 A.1: EASIROC1 の使用するチャンネルと E 検出器の ID の組み合わせ。シンチレータ ID の 0 ~ 11 は上流側から見て右側、12 ~ 19 は左側のシンチレータ群を表す。ID が小さいものは上側に位置する。

シンチレータ ID	MPPC ID	EASIROC CH	シンチレータ ID	MPPC ID	EASIROC CH
0	0	0	10	30	32
	1	1		31	33
	2	2		32	34
1	3	3	11	33	35
	4	4		34	36
	5	5		35	37
2	6	6	12	36	38
	7	7		37	39
	8	8		38	40
3	9	9	13	39	41
	10	10		40	42
	11	11		41	43
4	12	12	14	42	44
	13	13		43	45
	14	14		44	46
5	15	15	15	45	47
	16	16		46	48
	17	17		47	49
6	18	18	16	48	50
	19	19		49	51
	20	20		50	52
7	21	21	17	51	53
	22	22		52	54
	23	23		53	55

表 A.2: EASIROC1 の使用するチャンネルと E 検出器の ID の組み合わせ。表 A.1 の続き。

シンチレータ ID	MPPC ID	EASIROC CH	シンチレータ ID	MPPC ID	EASIROC CH
8	24	24	18	54	56
	25	25		55	57
	26	26		56	58
9	27	27	19	57	59
	28	28		58	60
	29	29		59	61

表 A.3: EASIROC2 の使用するチャンネルと E 検出器の ID の組み合わせ。表 A.1 のシンチレータ ID19 より後の ID のシンチレータには EASIROC2 を使用している。

シンチレータ ID	MPPC ID	EASIROC CH
20	60	0
	61	1
	62	2
21	63	3
	64	4
	65	5
22	66	6
	67	7
	68	8
23	69	9
	70	10
	71	11

表 A.4: EASIROC3 の使用するチャンネルと ΔE 検出器の ID の組み合わせ。シンチレータ ID の 24 ~ 30 は上流側から見て右側、31 ~ 37 は左側のシンチレータ群を表す。

シンチレータ ID	MPPC ID	EASIROC CH	シンチレータ ID	MPPC ID	EASIROC CH
24	72	0	31	86	7
	73	16		87	23
25	74	1	32	88	8
	75	17		89	24
26	76	2	33	90	9
	77	18		91	25
27	78	3	34	92	10
	79	19		93	26
28	80	4	35	94	11
	81	20		95	27
29	82	5	36	96	12
	83	21		97	28
30	84	6	37	98	13
	85	22		99	29

A.2 各 EASIROC の印加電圧

表 A.5: EASIOC1 の印加電圧。外部電源から 57.0 V を印加し、Input DAC を調整することで EASIROC からの電圧を微調整している。

EASIROC CH	Input DAC	印加電圧 [V]	EASIROC CH	Input DAC	印加電圧 [V]
0	311	57.96	32	280	57.42
1	304	57.84	33	292	57.64
2	314	58.02	34	338	58.44
3	362	58.86	35	362	58.86
4	357	58.78	36	361	58.84
5	370	59.00	37	285	57.50
6	311	57.96	38	352	58.68
7	344	58.54	39	333	58.36
8	360	58.82	40	341	58.50
9	328	58.26	41	298	57.74
10	346	58.58	42	296	57.70
11	320	58.12	43	312	57.98
12	315	58.04	44	280	57.42
13	323	58.18	45	374	59.08
14	304	57.84	46	372	59.04
15	302	57.50	47	339	58.46
16	321	58.14	48	339	58.18
17	303	57.82	49	323	58.36
18	272	57.28	50	333	58.70
19	311	57.96	51	353	58.68
20	341	58.50	52	332	58.34
21	304	57.84	53	330	58.30
22	286	57.52	54	292	57.64
23	282	57.46	55	280	57.42
24	291	57.62	56	309	57.94
25	320	58.12	57	285	57.50
26	315	58.04	58	298	57.74
27	295	57.68	59	276	57.36
28	358	58.80	60	280	57.42
29	326	58.24	61	295	57.68

表 A.6: EASIROC2 の印加電圧。外部電源から 57.0 V を印加し、Input DAC を調整することで EASIROC からの電圧を微調整している。

EASIROC CH	Input DAC	印加電圧 [V]
0	339	58.46
1	338	58.44
2	347	58.60
3	310	57.94
4	325	58.22
5	302	57.80
6	302	57.80
7	298	57.74
8	295	57.68
9	290	57.60
10	280	57.42
11	340	58.48

表 A.7: EASIOC3 の印加電圧。外部電源から 57.0 V を印加し、Input DAC を調整することで EASIROC からの電圧を微調整している。

EASIROC CH	Input DAC	印加電圧 [V]	EASIROC CH	Input DAC	印加電圧 [V]
0	303	57.82	16	288	57.56
1	295	57.68	17	291	57.62
2	281	57.44	18	283	57.48
3	297	57.72	19	296	57.70
4	271	57.26	20	270	57.24
5	288	57.56	21	296	57.70
6	295	57.68	22	270	57.60
7	283	57.48	23	296	57.22
8	277	57.36	24	290	57.60
9	288	57.56	25	272	57.28
10	288	57.56	26	277	57.36
11	295	57.68	27	270	57.24
12	262	57.10	28	288	57.56
13	290	57.60	29	270	57.24

A.3 各 EASIROC のペDESTAL

表 A.8: EASIROC1 の各チャンネルのペDESTAL

EASIROC CH	ペDESTAL [ch]	EASIROC CH	ペDESTAL [ch]
0	834.0	32	839.5
1	828.2	33	832.6
2	825.7	34	835.9
3	834.2	35	838.9
4	827.9	36	831.7
5	834.2	37	833.6
6	832.2	38	834.7
7	833.1	39	838.6
8	830.8	40	832.2
9	829.7	41	831.4
10	831.0	42	828.4
11	827.7	43	834.5
12	829.8	44	839.5
13	835.9	45	818.9
14	830.3	46	830.3
15	830.4	47	835.7
16	825.5	48	827.1
17	829.9	49	832.8
18	832.3	50	829.6
19	833.6	51	834.6
20	826.9	52	831.8
21	830.4	53	837.8
22	833.3	54	835.7
23	832.1	55	835.7
24	832.9	56	834.1
25	825.5	57	832.1
26	829.8	58	834.3
27	828.1	59	836.8
28	835.0	60	832.1
29	824.0	61	835.5

表 A.9: EASIROC2 の各チャンネルのペDESTAL

EASIROC CH	ペDESTAL [ch]
0	817.5
1	812.0
2	815.0
3	808.0
4	809.0
5	805.0
6	812.4
7	811.0
8	810.5
9	816.2
10	813.1
11	811.5

表 A.10: EASIROC3 の各チャンネルのペDESTAL

EASIROC CH	ペDESTAL [ch]	EASIROC CH	ペDESTAL [ch]
0	825.1	16	825.4
1	824.2	17	824.7
2	821.4	18	828.1
3	832.0	19	818.7
4	828.3	20	817.1
5	826.6	21	823.4
6	830.5	22	823.1
7	826.8	23	825.4
8	827.0	24	828.6
9	820.2	25	826.2
10	827.1	26	822.8
11	825.0	27	824.2
12	831.6	28	825.4
13	826.0	29	820.1

A.4 TOT と ADC の相関のフィッティングパラメータ

表 A.11: EASIROC1 の各チャンネルについて式 (5.10) でフィッティングをして得られたパラメータ

EASIROC CH	p_0	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7
0	-12.95	13.78	-1.067	4.099×10^{-2}	-7.869×10^{-4}	8.123×10^{-6}	-4.294×10^{-8}	9.187×10^{-11}
1	-27.25	15.50	-1.158	4.326×10^{-2}	-8.123×10^{-4}	8.194×10^{-6}	-4.228×10^{-8}	8.824×10^{-11}
2	-11.92	13.24	-1.017	3.920×10^{-2}	-7.509×10^{-4}	7.709×10^{-6}	-4.044×10^{-8}	8.588×10^{-11}
3	57.88	0.6902	-0.1875	1.125×10^{-2}	-2.773×10^{-4}	3.207×10^{-6}	-1.877×10^{-8}	4.498×10^{-11}
4	6.575	9.803	-0.7890	3.181×10^{-2}	-6.211×10^{-4}	6.446×10^{-6}	-3.404×10^{-8}	3.276×10^{-11}
5	36.57	4.513	-0.4353	2.035×10^{-2}	-4.257×10^{-4}	4.671×10^{-6}	-2.605×10^{-8}	5.905×10^{-11}
6	-16.41	14.07	-1.060	4.016×10^{-2}	-7.642×10^{-4}	7.852×10^{-6}	-4.146×10^{-8}	8.890×10^{-11}
7	-42.74	18.84	-1.407	5.236×10^{-2}	-9.895×10^{-4}	1.007×10^{-5}	-5.250×10^{-8}	1.105×10^{-10}
8	28.91	5.612	-0.5007	2.243×10^{-2}	-4.618×10^{-4}	5.021×10^{-6}	-2.783×10^{-8}	6.273×10^{-11}
9	-31.67	18.30	-1.437	5.590×10^{-2}	-1.096×10^{-3}	1.150×10^{-5}	-6.151×10^{-8}	1.325×10^{-10}
10	-36.22	18.40	-1.409	5.376×10^{-2}	-1.038×10^{-3}	1.076×10^{-5}	-5.703×10^{-8}	1.221×10^{-10}
11	18.63	7.557	-0.6274	2.665×10^{-2}	-5.380×10^{-4}	5.768×10^{-6}	-3.253×10^{-8}	6.998×10^{-11}
12	26.46	6.179	-0.5339	2.357×10^{-2}	-4.828×10^{-4}	5.225×10^{-6}	-2.883×10^{-8}	6.471×10^{-11}
13	-17.50	15.02	-1.19	4.702×10^{-2}	-9.274×10^{-4}	9.779×10^{-6}	-5.254×10^{-8}	1.138×10^{-10}
14	7.260	9.745	-0.7927	3.277×10^{-2}	-6.571×10^{-4}	7.012×10^{-6}	-3.813×10^{-8}	8.396×10^{-11}
15	9.307	9.260	-0.7454	3.052×10^{-2}	-6.052×10^{-4}	6.400×10^{-6}	-3.456×10^{-8}	7.582×10^{-11}
16	28.24	6.817	-0.6053	2.685×10^{-2}	-5.548×10^{-4}	6.044×10^{-6}	-3.350×10^{-8}	7.536×10^{-11}
17	-8.322	13.19	-1.023	3.969×10^{-2}	-7.617×10^{-4}	7.816×10^{-6}	-4.098×10^{-8}	8.711×10^{-11}
18	98.52	-7.258	0.3774	-6.615×10^{-3}	5.189×10^{-5}	8.733×10^{-8}	-3.733×10^{-9}	1.624×10^{-11}
19	24.79	6.867	-0.6193	2.750×10^{-2}	-5.700×10^{-4}	6.234×10^{-6}	-3.466×10^{-8}	7.805×10^{-11}
20	-43.34	19.91	-1.533	5.824×10^{-2}	-1.120×10^{-3}	1.154×10^{-5}	-6.069×10^{-8}	1.285×10^{-10}
21	65.02	-1.004	-5.062×10^{-2}	7.939×10^{-3}	-2.131×10^{-4}	2.707×10^{-6}	-1.690×10^{-8}	4.245×10^{-11}
22	38.76	4.302	-0.492	2.260×10^{-2}	-4.972×10^{-4}	5.661×10^{-6}	-3.247×10^{-8}	7.509×10^{-11}
23	47.66	2.163	-0.2720	1.534×10^{-2}	-3.431×10^{-4}	3.929×10^{-6}	-2.270×10^{-8}	5.340×10^{-11}
24	3.264	11.05	-0.8861	3.528×10^{-2}	-6.907×10^{-4}	7.239×10^{-6}	-3.879×10^{-8}	8.416×10^{-11}
25	22.52	7.562	-0.6411	2.729×10^{-2}	-5.481×10^{-4}	5.832×10^{-6}	-3.174×10^{-8}	7.045×10^{-11}
26	2.114	11.46	-0.9175	3.622×10^{-2}	-7.019×10^{-4}	7.282×10^{-6}	-3.874×10^{-8}	8.390×10^{-11}
27	-42.41	18.39	-1.353	4.952×10^{-2}	-9.233×10^{-4}	9.316×10^{-6}	-4.832×10^{-8}	1.017×10^{-10}
28	-16.55	14.63	-1.162	4.565×10^{-2}	-8.897×10^{-4}	9.247×10^{-6}	-4.892×10^{-8}	1.044×10^{-10}
29	51.51	2.046	-0.2990	1.700×10^{-2}	-3.865×10^{-4}	4.493×10^{-6}	-2.623×10^{-8}	6.175×10^{-11}
32	42.54	3.291	-0.3632	1.864×10^{-2}	-4.070×10^{-4}	4.582×10^{-6}	-2.593×10^{-8}	5.907×10^{-11}
33	-7.260	11.51	-0.8796	3.329×10^{-2}	-6.235×10^{-4}	6.279×10^{-6}	-3.248×10^{-8}	6.843×10^{-11}
34	-109.2	30.0	-2.131	7.488×10^{-2}	-1.364×10^{-3}	1.344×10^{-5}	-6.781×10^{-8}	1.379×10^{-10}

次のページへ続く。

EASIROC CH	p_0	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7
35	-96.22	27.22	-1.896	6.580×10^{-2}	-1.187×10^{-3}	1.164×10^{-5}	-5.868×10^{-8}	1.198×10^{-10}
36	-37.51	17.02	-1.258	4.620×10^{-2}	-8.605×10^{-4}	8.648×10^{-6}	-4.456×10^{-8}	9.294×10^{-11}
37	7.39	9.375	-0.7471	2.935×10^{-2}	-5.588×10^{-4}	5.672×10^{-6}	-2.940×10^{-8}	6.186×10^{-11}
38	-46.68	18.44	-1.335	4.798×10^{-2}	-8.780×10^{-4}	8.684×10^{-6}	-4.412×10^{-8}	9.099×10^{-11}
39	-15.34	13.49	-1.045	4.013×10^{-2}	-7.657×10^{-4}	7.808×10^{-6}	-4.060×10^{-8}	8.528×10^{-11}
40	17.69	7.091	-0.6098	2.559×10^{-2}	-5.064×10^{-4}	5.314×10^{-6}	-2.848×10^{-8}	6.214×10^{-11}
41	26.25	6.064	-0.5438	2.347×10^{-2}	-4.711×10^{-4}	4.991×10^{-6}	-2.685×10^{-8}	5.844×10^{-11}
42	8.072	9.408	-0.7729	3.181×10^{-2}	-6.339×10^{-4}	6.708×10^{-6}	-3.607×10^{-8}	7.825×10^{-11}
43	10.69	9.077	-0.7491	3.025×10^{-2}	-5.891×10^{-4}	6.100×10^{-6}	-3.218×10^{-8}	6.871×10^{-11}
44	11.44	8.331	-0.6657	2.645×10^{-2}	-5.072×10^{-4}	5.190×10^{-6}	-2.713×10^{-8}	5.757×10^{-11}
45	-59.92	20.79	-1.492	5.336×10^{-2}	-9.746×10^{-4}	9.606×10^{-6}	-4.849×10^{-8}	9.903×10^{-11}
46	-4.539	11.39	-0.8923	3.480×10^{-2}	-6.672×10^{-4}	6.826×10^{-6}	-3.560×10^{-8}	7.510×10^{-11}
47	6.706	9.567	-0.7669	3.063×10^{-2}	-5.958×10^{-4}	6.190×10^{-6}	-3.283×10^{-8}	7.054×10^{-11}
48	-50.50	18.75	-1.345	4.812×10^{-2}	-8.797×10^{-4}	8.688×10^{-6}	-4.397×10^{-8}	8.996×10^{-11}
49	-40.83	17.09	-1.236	4.477×10^{-2}	-8.279×10^{-4}	8.295×10^{-6}	-4.273×10^{-8}	8.931×10^{-11}
50	-88.22	24.19	-1.640	5.579×10^{-2}	-9.870×10^{-4}	9.508×10^{-6}	-4.717×10^{-8}	9.486×10^{-11}
51	-57.94	19.88	-1.406	4.963×10^{-2}	-8.983×10^{-4}	8.801×10^{-6}	-4.424×10^{-8}	9.001×10^{-11}
52	6.531	9.502	-7.801	3.126×10^{-2}	-6.099×10^{-4}	6.347×10^{-6}	-3.368×10^{-8}	7.220×10^{-11}
53	-28.87	15.12	-1.113	4.075×10^{-2}	-7.527×10^{-4}	7.499×10^{-6}	-3.829×10^{-8}	7.921×10^{-11}
54	-88.86	25.25	-1.764	6.149×10^{-2}	-1.1110×10^{-3}	1.086×10^{-5}	-5.416×10^{-8}	1.109×10^{-10}
55	-19.62	13.69	-1.011	3.721×10^{-2}	-6.871×10^{-4}	6.841×10^{-6}	-3.495×10^{-8}	7.242×10^{-11}
56	-0.5793	10.86	-0.8638	3.356×10^{-2}	-6.407×10^{-4}	6.562×10^{-6}	-3.541×10^{-8}	3.393×10^{-11}
57	-12.34	12.49	-0.9476	3.545×10^{-2}	-6.583×10^{-4}	6.558×10^{-6}	-3.345×10^{-8}	6.917×10^{-11}
58	-61.70	20.79	-1.479	5.244×10^{-2}	-9.543×10^{-4}	9.399×10^{-6}	-4.753×10^{-8}	9.735×10^{-11}
59	9.884	9.274	-0.7763	3.163×10^{-2}	-6.189×10^{-4}	6.397×10^{-6}	-3.349×10^{-8}	3.056×10^{-11}
60	-27.35	15.26	-1.151	4.276×10^{-2}	-7.986×10^{-4}	8.037×10^{-6}	-4.151×10^{-8}	8.705×10^{-11}
61	15.19	8.144	-0.6931	2.805×10^{-2}	-5.426×10^{-4}	5.585×10^{-6}	-2.939×10^{-8}	6.288×10^{-11}

表終了

表 A.12: EASIROC2 の各チャンネルについて式 (5.10) でフィッティングをして得られたパラメータ

EASIROC CH	p_0	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7
0	23.76	5.620	-0.4710	0.887×10^{-2}	-3.518×10^{-4}	3.491×10^{-6}	$-1. \times 10^{-8}$	9.187×10^{-11}
1	-12.87	11.90	-0.8968	3.305×10^{-2}	-6.043×10^{-4}	5.918×10^{-6}	-2.964×10^{-8}	6.015×10^{-11}
2	21.10	5.720	-0.4876	2.001×10^{-2}	-3.805×10^{-4}	3.815×10^{-6}	-1.946×10^{-8}	4.029×10^{-11}
3	24.12	5.112	-0.4390	1.812×10^{-2}	-3.433×10^{-4}	3.417×10^{-6}	-1.725×10^{-8}	3.536×10^{-11}
4	34.01	3.599	-0.3694	1.723×10^{-2}	-3.518×10^{-4}	3.723×10^{-6}	-1.986×10^{-8}	4.273×10^{-11}
5	37.95	2.744	-0.2773	0.276×10^{-2}	-2.479×10^{-4}	2.500×10^{-6}	-1.282×10^{-8}	2.707×10^{-11}

次のページへ続く。

EASIROC CH	p_0	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7
6	-16.25	12.23	-0.8915	3.178×10^{-2}	-5.639×10^{-4}	5.371×10^{-6}	-2.619×10^{-8}	5.181×10^{-11}
7	27.46	5.160	-0.4822	2.094×10^{-2}	-4.151×10^{-4}	4.307×10^{-6}	-2.262×10^{-8}	4.798×10^{-11}
8	25.73	4.746	-0.4230	1.829×10^{-2}	-3.601×10^{-4}	3.723×10^{-6}	-1.952×10^{-8}	4.144×10^{-11}
9	32.74	3.768	-0.3574	1.667×10^{-2}	-3.423×10^{-4}	36.54×10^{-6}	-1.964×10^{-8}	4.250×10^{-11}
10	54.84	-0.2458	-9.587×10^{-2}	7.899×10^{-3}	-1.835×10^{-4}	2.096×10^{-6}	-1.192×10^{-8}	2.744×10^{-11}
11	55.58	0.8822	-0.1965	1.197×10^{-2}	-2.695×10^{-4}	3.307×10^{-6}	-1.704×10^{-8}	3.848×10^{-11}

表終了

表 A.13: EASIROC3 の各チャンネルについて式 (5.10) でフィッティングをして得られたパラメータ

EASIROC CH	p_0	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7
0	65.50	-4.869	0.3885	-1.516×10^{-2}	4.540×10^{-4}	-7.652×10^{-6}	6.373×10^{-8}	1.958×10^{-10}
1	28.23	3.248	-0.3405	1.688×10^{-2}	-3.256×10^{-4}	2.914×10^{-6}	-1.018×10^{-8}	9.198×10^{-12}
2	7.653	7.300	-0.6475	2.855×10^{-2}	-5.705×10^{-4}	5.813×10^{-6}	-2.841×10^{-8}	5.792×10^{-11}
3	36.41	1.296	-0.1737	1.013×10^{-2}	-1.744×10^{-4}	1.009×10^{-6}	2.374×10^{-9}	-2.312×10^{-11}
4	-5.088	10.39	-0.9342	4.174×10^{-2}	-8.866×10^{-4}	9.855×10^{-6}	-5.438×10^{-8}	1.238×10^{-10}
5	24.68	4.006	-0.3997	1.942×10^{-2}	-3.835×10^{-4}	3.649×10^{-6}	-1.534×10^{-8}	2.660×10^{-11}
6	51.92	-1.851	0.1047	-2.2742×10^{-3}	1.476×10^{-4}	-3.315×10^{-6}	3.130×10^{-8}	-9.788×10^{-11}
7	56.47	-3.436	0.3033	-1.401×10^{-2}	4.838×10^{-4}	-8.687×10^{-6}	7.443×10^{-8}	-2.335×10^{-10}
8	65.78	-5.724	0.4815	-2.063×10^{-2}	6.287×10^{-4}	-1.056×10^{-5}	8.769×10^{-8}	-2.716×10^{-10}
9	44.17	-1.109	0.1026	-4.289×10^{-3}	2.354×10^{-4}	-5.340×10^{-6}	5.225×10^{-8}	-1.764×10^{-10}
10	34.99	1.502	-0.1518	7.007×10^{-3}	-3.609×10^{-5}	-1.677×10^{-6}	2.598×10^{-8}	-9.897×10^{-11}
11	4.847	8.424	-0.7580	3.431×10^{-2}	-7.222×10^{-4}	7.911×10^{-6}	-4.302×10^{-8}	9.876×10^{-11}
12	-27.69	15.85	-1.413	6.303×10^{-2}	-1.407×10^{-3}	1.693×10^{-5}	-1.044×10^{-7}	2.669×10^{-10}
13	29.76	2.940	-0.2963	1.552×10^{-2}	-2.989×10^{-4}	2.521×10^{-6}	-6.574×10^{-9}	-1.575×10^{-12}
16	80.82	-9.482	0.8284	-3.531×10^{-2}	9.585×10^{-4}	-1.463×10^{-5}	1.132×10^{-7}	-3.346×10^{-10}
17	55.26	-2.891	0.2201	-7.993×10^{-3}	2.933×10^{-4}	-5.77×10^{-6}	5.339×10^{-8}	-1.761×10^{-10}
18	54.09	-3.036	0.2654	-1.239×10^{-2}	4.615×10^{-4}	-8.767×10^{-6}	7.817×10^{-8}	-2.523×10^{-10}
19	91.25	-12.45	1.155	-5.163×10^{-2}	1.380×10^{-3}	-2.043×10^{-5}	1.530×10^{-7}	-4.372×10^{-10}
20	-9.047	11.96	-1.084	4.858×10^{-2}	-1.032×10^{-3}	1.124×10^{-5}	-5.858×10^{-8}	1.189×10^{-10}
21	120.1	-20.02	1.883	-8.674×10^{-2}	2.290×10^{-3}	-3.326×10^{-5}	2.454×10^{-7}	-7.040×10^{-10}
22	2.443	9.527	-0.8880	4.050×10^{-2}	-8.547×10^{-4}	9.225×10^{-6}	-4.827×10^{-8}	1.032×10^{-10}
23	42.22	0.3819	-8.8796×10^{-2}	5.864×10^{-3}	-3.606×10^{-5}	-1.499×10^{-6}	2.455×10^{-8}	-9.619×10^{-11}
24	63.66	-4.378	0.3165	-1.326×10^{-2}	4.347×10^{-4}	-7.495×10^{-6}	6.417×10^{-8}	-1.829×10^{-10}
25	18.51	5.944	-0.5985	2.958×10^{-2}	-6.233×10^{-2}	6.324×10^{-6}	-2.777×10^{-8}	4.138×10^{-11}
26	60.2	-3.469	0.2148	-7.078×10^{-3}	2.527×10^{-4}	-4.834×10^{-6}	4.301×10^{-8}	-1.316×10^{-10}
27	85.85	-7.687	0.4994	-1.834×10^{-2}	5.023×10^{-4}	-7.861×10^{-6}	6.155×10^{-8}	-1.799×10^{-10}
28	29.87	3.410	-0.3916	2.015×10^{-2}	-4.114×10^{-4}	4.035×10^{-6}	-1.753×10^{-8}	2.997×10^{-11}

次のページへ続く。

EASIROC CH	p_0	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7
29	56.25	-2.307	9.808×10^{-2}	-1.963×10^{-3}	1.409×10^{-4}	-3.551×10^{-6}	3.554×10^{-8}	-1.164×10^{-10}

表終了

参考文献

- [1] 鷲見義雄. 原子核物理学入門. 裳華房, 1997.
- [2] L. Lapikás, Nuclear Physics A, **553**, 209~308 (2021)
- [3] T. Aumann *et al.*, Prog. Part. Nuclear Physics, **118**, 103847 (2021)
- [4] K. S. Egiyan *et al.*, Phys. Rev. C **68**, 014313 (2003)
- [5] R. Subedi *et al.*, Science **320**, 1476 (2008)
- [6] M. Duer *et al.*(Jefferson Lab CLAS Collaboration), Nature **560**, 617 (2018)
- [7] 中村隆司 著, 「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)
- [8] S. Terashima *et al.*, Phys.Rev.Lett. **121**, 241501 (2018)
- [9] National Nuclear Data Center, level scheme
<https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/>
- [10] K. Sekiguchi *et al.*, Phys.Rev.Lett. **95**, 162301 (2018)
- [11] 融原田, 崎悟比連. Kek サマースクール ハイパー核実践講座-あなたも計算できる- 反応コーステキスト
<http://www.th.phys.titech.ac.jp/~exotic/KEKschool.pdf>
- [12] T. Kobayashi *et al.*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B. **317**, 294 (2013)
- [13] Charged Particle Detector
<https://ribf.riken.jp/SAMURAI/index.php?ChargedParticleDetector>
- [14] 堀川晃太, 修士論文, 東京工業大学 (2023)
- [15] 山田啓貴, 学士論文, 東京工業大学 (2017)
- [16] 海老名直樹, 修士論文, 東京工業大学 (2022)
- [17] H. Sato *et al.*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, **23**, 4500308 (2013)
- [18] N. Chiga *et al.*, RIKEN accel. Prof. Ref.**49**, 165 (2016)
- [19] N. Chiga *et al.*, RIKEN accel. Prof. Ref.**50**, 177 (2017)
- [20] T. Y. Saito *et al.*, RIKEN accel. Prof. Ref.**50**, 178 (2017)
- [21] Nebula specifications.
<http://be.nucl.ap.titech.ac.jp/~nebula/specifications.php>
- [22] ELJEN TECHNOLOGY, GENERAL PURPOSE EJ-200, EJ-204, EJ-208, EJ-212
<https://eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-200-ej-204-ej-208-ej-212>
- [23] 浜松ホトニクス, Si フォトダイオード
https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/si_pd_kspd9001j.pdf

- [24] 浜松ホトニクス, Si APD
https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/si-apd_kapd9007j.pdf
- [25] 浜松ホトニクス, MPPC とは —MPPC (SiPM)
https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/mppc/what_is_mppc/index.html
- [26] 浜松ホトニクス, MPPC S13360-3025CS
https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/mppc/mppc_mppc-array/S13360-3025CS.html
- [27] 浜松ホトニクス, MPPC S13360-6025CS
https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/mppc/mppc_mppc-array/S13360-6025CS.html
- [28] 浜松ホトニクス, MPPC S13360 シリーズ データシート
https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/s13360_series_kapd1052j.pdf
- [29] 石島直樹, 仲居勇樹. EASIROC MODULE User Guide ver. 1.0 (2014)
- [30] 竹馬匠泰, ニュートリノ反応断面積測定実験のためのミュオンレンジ検出器および読み出しエレクトロニクスの研究開発 (2016)
- [31] 磯部 駆, 学士論文, 東京工業大学 (2022)
- [32] Passage of particles through matter
<http://pdg.lbl.gov/2005/reviews/passagerpp.pdf>
- [33] RCNP 大阪大学核物理研究センター
<https://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/Divisions/np1-a/RCF/RCNPCF-GRj.html>
- [34] LISE++ : Rare Isotope Beam Production
<http://lise.nscl.msu.edu/lise.html>
- [35] K. Sekiguchi *et al.*, Phys.Rev.Lett. **65**, 034003 (2002)
- [36] A. Watanabe *et al.*, Phys.Rev.Lett. **103**, 044001 (2021)

謝辞

本研究の遂行に当たり、多くの方々からご指導と助言をいただきました。指導教官の中村隆司教授には研究についての指摘を何度もいただき、研究者としての基本や考え方などを徹底的に教わりました。自身の研究について議論をするたびに成長を実感できました。近藤洋介助教には解析の仕方や研究の進め方、論文の執筆について何度も助言をいただきました。佐藤義輝特任准教授には私が研究を進めるにあたり有益な情報を多くいただきました。理化学研究所の Wang He 氏、江川弘之氏、磯部忠昭氏、He Yan 氏には検出器の開発やデータ解析をするにあたって様々な相談に乗っていただきました。後輩の石黒宗一郎氏には実験の準備を何度も手伝っていただきました。また、中村研究室のメンバーである、先輩の松井智輝氏、同輩の Lee Hyeji 氏、大澤悠真氏、後輩の高橋里緒氏、池田旭輝氏、槇村泰都氏には研究以外にも多くの点で支えられ研究の励みになりました。本研究に関わってくださったすべての方に深く感謝申し上げます。最後に、これまで支えていただいた家族に心より感謝申し上げます。