修士論文

# SπRIT 実験のための
# トリガーシンチレータアレイの開発

京都大学大学院 理学研究科
物理学・宇宙物理学専攻 物理学第二分野
原子核・ハドロン物理学研究室

金子 雅紀

**概要**

核物質の熱力学的性質を記述する状態方程式 (Equation of State：EOS) を決定することは、中性子星の質量と半径の関係を表す M-R 曲線や生成・冷却機構を解明する上で非常に重要である。核物質 EOS は系の状態によって式の形が決定されるが、(中性子星内部のような) 絶対零度極限における非対称核物質の平均エネルギーは、核物質の密度 $\rho$ とアイソスピン非対称度 $\delta$ の関数として以下のように記述される。

$$E(\rho,\delta) = E(\rho,0) + E_{sym}(\rho)\delta^2 + O(\delta^4)$$

ここで $\rho$ と $\delta$ はそれぞれ、核物質の中性子密度を $\rho_n$、陽子密度を $\rho_p$ として $\rho = \rho_n + \rho_n$、$\delta = (\rho_n - \rho_p)/\rho$ と表される。上式第二項の係数にあたる $E_{sym}(\rho)$ は対称エネルギーと呼ばれており、原子核飽和密度 $\rho_0$ 以下の領域においては、原子核の電気双極応答や中性子スキン厚の測定、低エネルギー重イオン衝突実験などによって精度良く制限が与えられている。その一方で、高密度領域においては精密なデータが揃っておらず、対称エネルギーの密度依存性は理論モデル毎に大きく異なっているのが現状である。

2015 年度より開始される SπRIT 実験は、理研 RIBF の基幹装置 SAMURAI スペクトロメータにおける重イオン衝突を用いて、$\rho \simeq 2\rho$ の高密度非対称核物質の対称エネルギーへ強力な制限を与えることを目的とする。広範囲の Sn+Sn 衝突系から得られる $\pi^-/\pi^+$、$n/p$、$t/^3$He 等の収量比を、大規模飛跡検出器 SπRIT-TPC 及び中性子検出器により測定することで、系統的に対称エネルギーの寄与を評価する。一般的に高エネルギー重イオン衝突実験においては、衝突の際に瞬間的に原子核同士が重なる部分において高密度領域が生じ、反応に寄与する部分となる。この領域は、衝突係数の大小によって生成される量が左右されるが、衝突係数は反応の多重度と強い相関を持つために、多重度を測定することのできる検出器が必要不可欠である。SπRIT 実験においては、衝突係数の小さい中心衝突イベントを選別することで高密度非対称核物質における対称エネルギーの寄与をより明瞭に抽出させるため、多重度に応じてトリガー信号を生成するための検出器 (以下、多重度トリガーアレイと呼ぶ) が重要な役割を果たす。多重度トリガーアレイは、陽子をはじめとする荷電粒子を測定するためのシンチレータを SπRIT-TPC 両側面に 30 本ずつ配置し、波長変換ファイバーと MPPC によりシンチレーション光を検出する仕様である。また、MPPC 読み出し専用 ASIC である EASIROC を搭載した FPGA 制御の汎用モジュールにより、MPPC の読み出し及び、多重度の計算とトリガー信号生成を行う。実機において用いる押し出し型シンチレータや波長変換ファイバー、MPPC 読み出しは既に T2K グループのニュートリノモニターで使用されており、基本的な性能評価は行われているため、本論文においては SπRIT 実験において必要となる当該トリガー系の設計・開発と、重イオン衝突実験を想定した性能評価を行った結果に関して述べる。

本研究においてトリガー信号生成のためのロジック回路を作成して FPGA へ実装、動作試験を行った結果、そのモジュール内における遅延時間が約 52ns となり、SπRIT-TPC のトラッキングのためのトリガーに対する要求性能を満たすことが判明した。また、HIMAC において 300MeV の $^{132}$Xe ビームを用いたテスト実験を行い、シンチレータの荷電粒子に対する応答として、MPPC から遠い位置に入射した場合でも、数 p.e. という EASIROC 閾値に対して十分な光量 (MPPC から 37.5cm で約 50p.e.) が得られることや、シンチレータ間におけるクロストーク問題などの知見を得た。テスト実験の結果を受けて、宇宙線を用いたシンチレータ間クロストーク問題の考察を行い、約 35p.e. の光量に対しては多重度トリガーアレイ実機の配置に対してクロストークを考慮する必要はなく、多重度計算に支障を及ぼさないことを確認した。また、MPPC と反対側のファイバー端面に反射加工をすることにより、最大 14% 光量が回復する効果が得られた。

今後においては、シンチレータの効率的な遮光によるセグメント化や MPPC の電源供給方法、大きな光量の信号やより多くのヒットがあった場合の多重度計算ロジックの耐久性などに関する性能評価が課題であり、SπRIT 実験の要求を満たしたことを確認した上で実機完成を目指す。

# 目次


1 **序論** 11

1.1 核物質の状態方程式 . . . 11
1.2 核物質の対称エネルギー . . . 13
1.3 SπRIT 実験 . . . 15
1.3.1 RIBF 施設・基幹装置 SAMURAI スペクトロメータ . . . 15
1.3.2 対称エネルギーのプローブ：パイオン生成比 . . . 16
1.3.3 SπRIT 実験の検出器群 . . . 17
1.3.4 重イオン衝突の多重度 . . . 21
1.4 本研究の目的 . . . 22

2 **多重度トリガーアレイ**
Multiplicity Trigger Array 23

2.1 要求性能 . . . 23
2.2 押し出し型シンチレータ (Extruded Scintillator) . . . 23
2.3 波長変換ファイバー . . . 25
2.4 Multi Pixel Photon Counter : MPPC . . . 26
2.4.1 MPPC の動作原理 . . . 26
2.4.2 MPPC のノイズ特性 . . . 28
2.4.3 GOMI コネクタ . . . 29
2.5 EASIROC . . . 30
2.5.1 EASIROC MODULE . . . 31
2.5.2 VME EASIROC Module . . . 33
2.5.3 多重度トリガー生成のためのロジック回路 . . . 34
2.5.4 多重度トリガーロジック部における遅延時間の簡易測定 . . . 35

3 **シミュレーション** 39

4 HIMAC **テスト実験** 43

4.1 HIMAC . . . 43
4.2 HIMAC テスト実験の目的 . . . 44
4.3 測定のセットアップ . . . 45
4.3.1 光量の測定 . . . 45
4.3.2 光量の定義 . . . 48
4.3.3 測定した結果 . . . 49
4.3.4 シンチレータのクロストークの確認 . . . 50
4.4 生じた問題点と原因の検証 . . . 55
4.4.1 バイアス電源分岐基板のクロストーク . . . 55

4.5 考察 . . . . . 60

**5 宇宙線と線源による評価** 63
5.1 シンチレータ間クロストーク . . . . . 63
5.2 ファイバー端面の扱い . . . . . 65
5.3 考察 . . . . . 66

**6 結論と今後の方向性** 69

**謝辞** 71

**付録** 73
.1 Δ アイソバーモデル . . . . . 73

# 図目次


1.1 $\alpha$ 非弾性散乱を用いた E0 遷移エネルギーから求められる核物質の非圧縮率 $K_{nm}$ の一覧 . . . 12
1.2 対称な核物質における圧力の密度依存性 . . . 12
1.3 原子核密度 $\rho_0$ 近傍において実験的に与えられている対称エネルギーの制限 . . . 14
1.4 対称エネルギーの理論曲線 . . . 14
1.5 RIBF におけるビームライン俯瞰図 . . . 15
1.6 Sn+Sn 衝突系における、荷電パイオン生成比のアイソスピン非対称度及び入射エネルギー依存性 . . . 16
1.7 入射エネルギー毎、反応時間毎の荷電パイオン生成比 vs 中性子/陽子生成比 . . . 17
1.8 S$\pi$RIT-TPC のデザイン . . . 18
1.9 NEBULA の写真 . . . 19
1.10 NeuLAND の写真 . . . 19
1.11 ビーム下流の検出器群 . . . 20
1.12 中心衝突、周辺衝突の概念図 . . . 21
2.1 押し出し型シンチレータの概略図 . . . 24
2.2 シンチレータ端面 . . . 24
2.3 Y-11 の吸収・発光波長の特性曲線 . . . 25
2.4 430nm の励起光をファイバーに入射したときの発光スペクトル . . . 25
2.5 ファイバーの断面図、マルチクラッド型の概略 . . . 26
2.6 MPPC の動作原理の概略 . . . 27
2.7 1.3mm × 1.3mmMPPC 受光面の顕微鏡写真 (150 倍) . . . 28
2.8 実機に用いるセラミック型 MPPC . . . 28
2.9 GOMI コネクタの写真 . . . 29
2.10 EASIROC 内部の 1ch アナログ . . . 31
2.11 EASIROC MODULE 内部基板の概観 . . . 33
2.12 VME EASIROC の内部基板 . . . 34
2.13 多重度トリガー生成のためのロジック回路の略図 . . . 35
2.14 遅延時間簡易測定の概要図 . . . 36
2.15 オシロスコープによる Function generator からの出力 . . . 37
2.16 オシロスコープによる多重度トリガー生成にかかる遅延時間測定 . . . 37
3.1 GEANT4 により視覚化されたシミュレーションのジオメトリー . . . 39
3.2 トリガーアレイによる重イオン衝突イベントの選別の様子 . . . 40
4.1 HIMAC の全体図 . . . 43
4.2 物理・汎用照射室の概略図 . . . 44
4.3 試験機のセットアップ概要 . . . 46
4.4 松定電源フロントパネル . . . 47
4.5 背面の J2 バス . . . 47

4.6 分岐回路概念図 . . . . . 47
4.7 電源分岐回路写真 . . . . . 47
4.8 試験機のセットアップの写真 (光量測定) . . . . . 48
4.9 LED によるゲインチェックのセットアップ概観 . . . . . 49
4.10 LED により得られたヒストグラム . . . . . 49
4.11 MPPC 側のシンチレータ端面から 22.5cm の位置に荷電粒子が入射したときに実際に得られた MPPC ヒストグラム . . . . . 49
4.12 シンチレータクロストークチェックの概略図 . . . . . 51
4.13 シンチレータクロストークチェックの際のヒストグラム (遮光なし) . . . . . 52
4.14 MPPC D と MPPC A の相関 . . . . . 53
4.15 MPPC D と MPPC B の相関 . . . . . 53
4.16 MPPC D と MPPC C の相関 . . . . . 53
4.17 MPPC D と MPPC E の相関 . . . . . 53
4.18 MPPC D と MPPC F の相関 . . . . . 53
4.19 シンチレータクロストークチェックの際のヒストグラム (遮光あり) . . . . . 54
4.20 シンチレータ端面から 22.5cm の位置に粒子を通過させて光量を測定した際における、EASIROC の ADC ヒストグラムの一覧 (ch0-ch15) . . . . . 56
4.21 ADC ヒストグラム一覧：ch16-ch31 . . . . . 56
4.22 ADC ヒストグラム一覧：ch32-ch47 . . . . . 57
4.23 ADC ヒストグラム一覧：ch48-ch63 . . . . . 57
4.24 LED を用いて MPPC にパルス光を照射したときにおける EASIROC の ADC ヒストグラムの一覧 (ch0-ch15) . . . . . 59
4.25 ADC ヒストグラム一覧：ch16-ch31 . . . . . 59
4.26 分岐基板の裏面 . . . . . 60
5.1 クロストーク測定セットアップの概要 . . . . . 63
5.2 1cm × 45cm の面が接触するように固定したシンチレータ . . . . . 63
5.3 片方にアルミを巻いて遮光したもの . . . . . 63
5.4 遮光なしの場合のシンチレータ A . . . . . 64
5.5 遮光なしの場合のシンチレータ B . . . . . 64
5.6 遮光ありの場合のシンチレータ A . . . . . 64
5.7 遮光ありの場合のシンチレータ B . . . . . 64
5.8 酸化チタン反射材、ELJEN TECHNOLOGY 社製 EJ-510 . . . . . 65
5.9 EJ-510 の基礎性能 (反射効率 vs 光の波長) . . . . . 65
5.10 ファイバー端面チェック時のセットアップ概略 . . . . . 66
A.1 400MeV/A 入射エネルギーにおける $^{132}$Sn+$^{124}$Sn 反応の $\pi$ 中間子生成の多重度 . . . . . 73

# 表目次


1.1 SπRIT-TPC のパラメータ . . . . . 19
1.2 SπRIT 実験において用いる衝突系と入射エネルギー . . . . . 21
2.1 25°C における MPPC の基礎的特性 . . . . . 29
3.1 UrQMD + GEANT4 シミュレーションにより得られた多重度トリガーによるイベント選別の様子 . . . . . 41
4.1 得られた光量 (MPPC キャリブレーションのみ) . . . . . 50
4.2 クロストーク&アフターパルスレート補正後の光量 . . . . . 50
5.1 宇宙線によるクロストーク測定 (MPPC クロストーク&アフターパルス補正済み) . . . . . 64
5.2 $^{90}$Sr 線源 (MPPC から 32.5cm) によるファイバー端面を加工したときの光量測定 . . . . . 66
5.3 $^{90}$Sr 線源 (MPPC から 22.5cm) によるファイバー端面を加工したときの光量測定 . . . . . 66
A.1 核子-核子散乱における $\pi$ 中間子生成比 . . . . . 74

# 1 序論

## 1.1 核物質の状態方程式

原子核は、有限個の核子が有限領域に束縛された量子力学的多体系と考えることができる。その性質は核子間に働く核力により規定されるが、量子力学に基づくミクロな性質のみならず、マクロな性質を持ち合わせていることは、液滴模型や Fermi ガス模型などの簡単なモデルによってよく知られているところである。

本論文にて扱う “核物質 ” とは、原子核における核子の個数や存在領域を無限大に拡張した、一種の理想的な平衡状態としての核子多体系である。核物質においては、電荷を持つ陽子どうしに働く Coulomb 力は打ち消し合うことで無視されるため、その現象は Coulomb 力を取り除いた核力により支配される。また、核物質は巨視的な核子の系を考えているため、統計力学の概念を適用することが可能であり、状態方程式 (Equation of State : EOS) により系の性質が理解される。EOS に対する理解は、その内部が中性子過剰な核物質により構成されていると考えられる中性子星に関する情報を得る上で重要であり、核物質の EOS を決定することで超新星爆発後の中性子星の生成・冷却、質量と半径の関係や内部構造など、様々な物理の解明が期待される。

核物質の EOS はエネルギー、温度、密度、圧力などの熱力学的な物理量と、アイソスピン非対称度を用いて記述される。アイソスピン非対称度とは核物質中の陽子と中性子の密度差を示すパラメータであり、陽子密度を $\rho_p$、中性子密度を $\rho_n$ とすると、アイソスピン非対称度を $\delta$ として、$\delta = (\rho_n - \rho_p)/(\rho_n + \rho_p)$ と書ける。中性子星内部のような、$T \sim 0$ 極限下の非対称な核物質における核子当たりの平均エネルギーは、密度とアイソスピン非対称度の関数であり、以下のように $\delta$ で展開できる [1]。

$$E(\rho, \delta) = E(\rho, 0) + E_{sym}(\rho)\delta^2 + O(\delta^4) \tag{1.1}$$

ここで、$\rho$ は核物質の密度であり、 $\rho = \rho_n + \rho_p$ である。$\delta$ の奇数次の項が存在しないのは、核子にアイソスピン交換対称性が成立するためである。(1.1) 式の第一項はアイソスピン非対称度に依存しない、つまりアイソスピンに関して対称な核物質のエネルギーを表している。$E(\rho, 0)$ を原子核飽和密度 $\rho_0 = 0.16fm^{-3}$ 付近で展開すると、次式が得られる。

$$E(\rho, 0) = E(\rho_0, 0) + \frac{K_0}{18}\,\varepsilon^2 + O(\varepsilon^3) \tag{1.2}$$

ただし、

$$\varepsilon = (\rho - \rho_0)/\rho_0 \ , \tag{1.3}$$

$$K_0 = 9\rho_0^2 \frac{\partial^2 E(\rho, 0)}{\partial \rho^2}\Big|_{\rho=\rho_0} = 9\frac{\partial P(\rho, 0)}{\partial \rho}\Big|_{\rho=\rho_0} \tag{1.4}$$

であり、$K_0$ は核物質の非圧縮率、$P(\rho, 0)$ は圧力に各々対応する。

対称な核物質のエネルギーに関しては様々な先行研究があり、その理解が進んでいる。密度 $\rho_0$ においては、$\alpha$ ビームの非弾性散乱による原子核の E0 遷移強度の測定により、$K_0 = 231 \pm 5$ MeV であることが分かっている [2]。また、高密度領域 $2\rho_0 < \rho < 5\rho_0$ においては、原子核衝突の集団的フローなどから、210MeV-300MeV の制限が与えられている [3]。

(1.1) 式の $\delta^2$ に比例する $E_{sym}(\rho)$ は、対称エネルギー項と呼ばれており、非対称な核物質の性質を決める上で非常に重要な項である。次節にて詳述する。

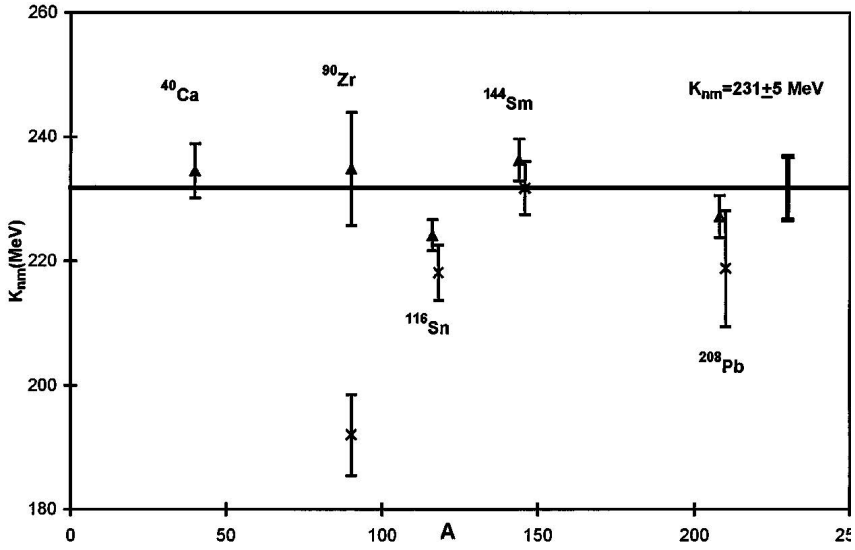


図 1.1　$\alpha$ 非弾性散乱を用いた E0 遷移エネルギーから求められる核物質の非圧縮率 $K_{nm}$ の一覧。

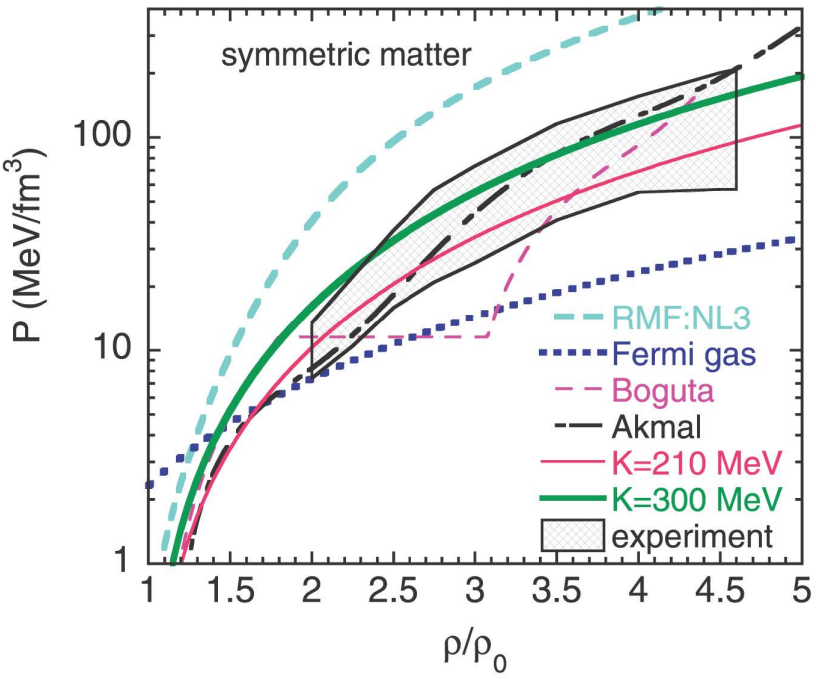


図 1.2　対称な核物質における圧力の密度依存性。

## 1.2 核物質の対称エネルギー

対称エネルギー $E_{sym}$ を (1.2) 式と同様に展開すると、

$$E_{sym}(\rho) = E_{sym}(\rho_0) + \frac{L}{3}\,\varepsilon + \frac{K_{sym}}{18}\,\varepsilon^2 + O(\varepsilon^3) \tag{1.5}$$

ただし、

$$L = 3\rho_0 \frac{\partial E_{sym}(\rho)}{\partial \rho}\Big|_{\rho=\rho_0}\ , \tag{1.6}$$

$$K_{sym} = 9\rho_0^2 \frac{\partial^2 E_{sym}(\rho)}{\partial \rho^2}\Big|_{\rho=\rho_0} \tag{1.7}$$

であり [4]、L は中性子過剰原子核において見られる中性子スキン厚に比例する量であることが知られている [5]。

(1.5) 式の第一項 $E_{sym}(\rho_0)$ は、$\rho = \rho_0$ 付近における核物質の対称エネルギー、つまり原子核内部の対称エネルギーをよく表す。安定核においては、経験的に以下の Bethe-Weizsäcker の質量公式が成立するが、第四項 $b_{sym}$ が $E_{sym}(\rho \simeq \rho_0)$ に対応する。

$$B(A,Z) = b_{vol}A - b_{surf}A^{2/3} - b_{Coul}\frac{Z^2}{A^{1/3}} - b_{sym}\frac{(A-2Z)^2}{A} + \delta(A) \tag{1.8}$$

質量公式において、陽子数と中性子数の差が大きいほど原子核が不安定になること、対称エネルギー項である $b_{sym}$ はおよそ 23MeV 程度であることが知られている。すなわち、$E_{sym}(\rho_0) > 0$ であり、アイソスピン非対称度が大きいほど状態方程式 (1.1) において、系のエネルギーとしては大きくなる。このことは、二つの核子の束縛系として、陽子-陽子や中性子-中性子の束縛系が存在せず、重陽子のみが存在するという点からも定性的に理解できる。

(1.5) 式の二項目以降は、上述の通り、中性子スキンや重イオン衝突などのアイソスピンに関して非対称な系がそのプローブとなっており、特に原子核密度以下においてはその研究が進んでいる。最近の実験による、密度 $\rho_0$ 付近の $E_{sym}(\rho)$ と $L$ に実験的に与えられている制限を図 1.3 に示す [6]。実験的に決定された $\rho_0$ 付近の制限を与えるのは、重イオン衝突におけるアイソスピン拡散 [7]、transverse collective flow[8]、ピグミー双極子共鳴 [11]、鉛原子核の陽子弾性散乱 [10]、アイソバリックアナログ状態の観測 [9]、中性子星半径からの制限などと非常に豊富なプローブによるものである。

このように、対称エネルギーは低密度領域 $\rho < \rho_0$ においては豊富なプローブを用いて強力な制限が与えられている一方で、高密度領域 $\rho > \rho_0$ においては未だ正確なデータが得られていないのが現状である。理論予想も相互作用をどのように導入するかにより、その振る舞いは大きく異なる。図 1.4 に Skyrme-Hartree-Fock モデルの相互作用を考慮したポテンシャルを用いた理論曲線を示すが、単調増加するようなモデルは Stiff な EOS、$\rho_0$ 近傍で極大値を取った後、減少するモデルを Soft な EOS と呼ばれている。

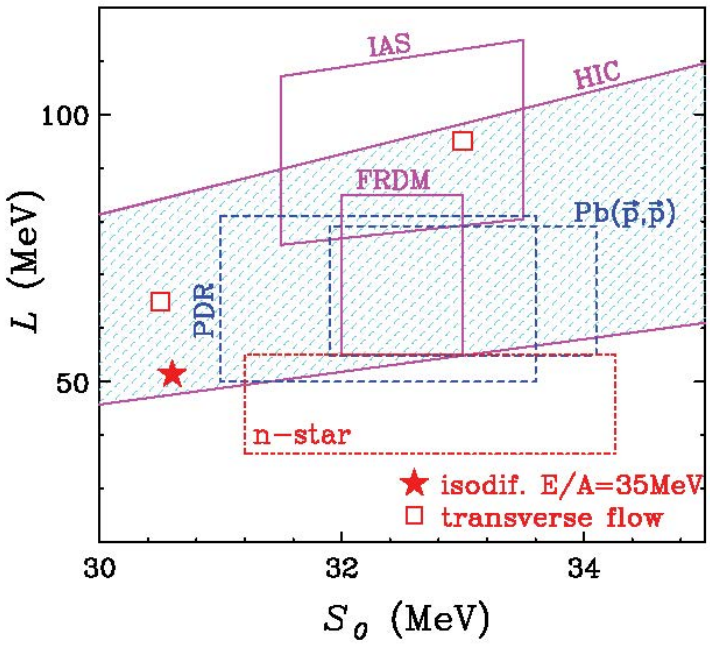


図 1.3　原子核密度 $\rho_0$ 近傍において実験的に与えられている対称エネルギーの制限。横軸 $S_0$ は $E_{sym}(\rho_0)$ に対応する。

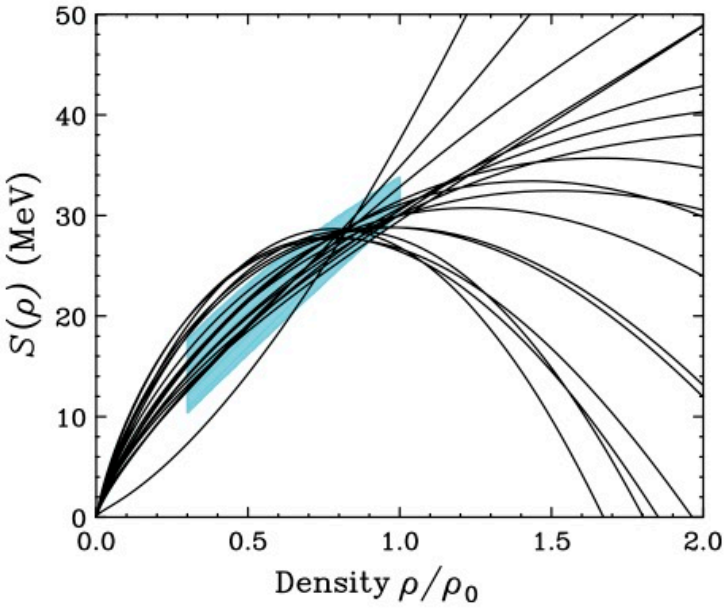


図 1.4　対称エネルギーの理論曲線。縦軸は $S(\rho)$ は $E_{sym}(\rho)$、青い網掛けは図 1.3 の重イオン衝突実験 (HIC) による制限に対応している。

## 1.3 SπRIT 実験

$\rho > \rho_0$ の高密度領域における対称エネルギーに対して強力な制限を与えるために計画されている実験が SπRIT 実験である。“SπRIT”とは、SAMURAI-pion Reconstruction Ion-Tracker の略であり、理化学研究所 RIBF 施設の SAMURAI スペクトロメータに TPC を設置して重イオン衝突からの荷電パイオン生成比、n/p 比、t/$^3$He 比、粒子フローなどを測定する。以下、実験の概要について説明する。

### 1.3.1 RIBF 施設・基幹装置 SAMURAI スペクトロメータ

RIBF とは、Radio Isotope Beam Factory(不安定核ビーム工場) の略であり、埼玉県和光市に位置する理化学研究所内のサイクロトロン施設である。RIBF 施設では、ECR イオン源で生成したイオンを線形加速器、4 種類のリングサイクロトロンを介して段階的に加速させる。最終段のサイクロトロンは SRC と呼ばれる超伝導リングサイクロトロンであり、ビームのエネルギーは最高で 345MeV/A(核子当たりエネルギー) まで加速することが可能である。その後、加速させたビームを一次ターゲットと衝突させることで生じる核破砕反応により、様々な原子核の二次粒子が生成される。ここから必要なアイソトープを選別するために、BigRIPS と呼ばれる核破砕片分析を用いてビームチューニングを行い、各実験エリアに輸送する。

SπRIT 実験は RIBF 施設の基幹装置の一つである多種粒子測定装置 SAMURAI(Superconducting Analyzer for MUlti-particle from RadioIsotope beams) スペクトロメータを用いる。最大 7Tm まで磁場を印可させることのできる SAMURAI 双極電磁石はその根幹であり、磁石内部に大立体角飛跡検出器 TPC を設置することで重イオン衝突から生じる荷電粒子の精密な収量測定を行う。

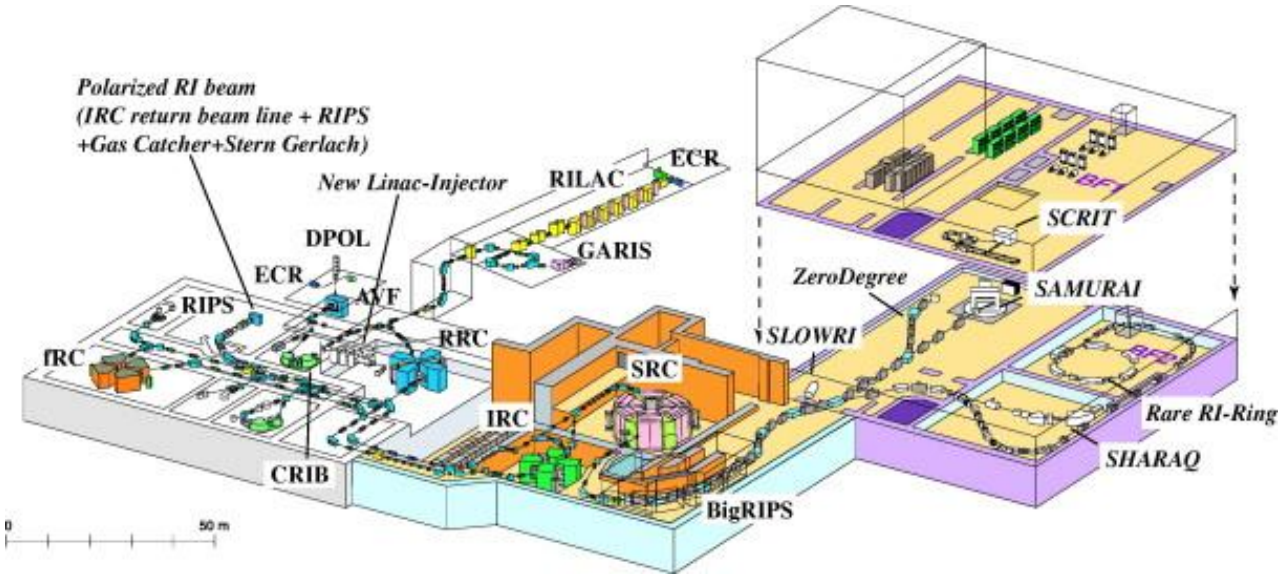


図 1.5　RIBF におけるビームライン俯瞰図。

### 1.3.2　対称エネルギーのプローブ：パイオン生成比

SπRIT 実験の目的は、上述のように高密度非対称核物質における対称エネルギーの寄与を測定、密度依存性を決定することである。二倍の $\rho_0$ 程度の密度を実験室において達成する手段の一つが、RIBF 施設等で行われている重イオン衝突である。

重イオン衝突においては、原子核のサイズが反応に影響する。入射原子核とターゲット原子核が衝突する瞬間に、その衝突係数に応じて原子核同士が重なる部分が形成されるが、その重なり部分 (overlap) において原子核飽和密度を越える高密度状態が達成され、パイオンから陽子・中性子などの様々な原子核が放出される。ここで、核子-核子衝突における荷電パイオンの生成比を Δ アイソバーモデルを用いて計算した式として、

$$\frac{\pi^-}{\pi^+} = \frac{5N^2 + NZ}{5Z^2 + ZN} \simeq \left(\frac{N}{Z}\right)^2 \tag{1.9}$$

がある [12]。詳しくは付録にて述べる。ここで、N、Z はそれぞれ入射原子核・ターゲット原子核の衝突時に生じる overlap に対応する、反応に関与した中性子数と陽子数である。一次的に原子核衝突により生じたパイオンは、overlap 部分から放出されるまでに、overlap 部分において再び吸収・散乱等の反応が生じた後に放出されるために、この生成比には変化が加えられ、最終的に $(N/Z)^2$ と $N/Z$ の間になることが知られている [1]。

そのため、最終的な正負パイオンの収量比を測定し、$(N/Z)^2$ との比較を行うことで、overlap(核物質) の内部における対称エネルギーの寄与に関する情報を得ることができる。図 1.6 にスズビーム・スズターゲットの衝突系におけるパイオン生成比を計算した結果を示す。

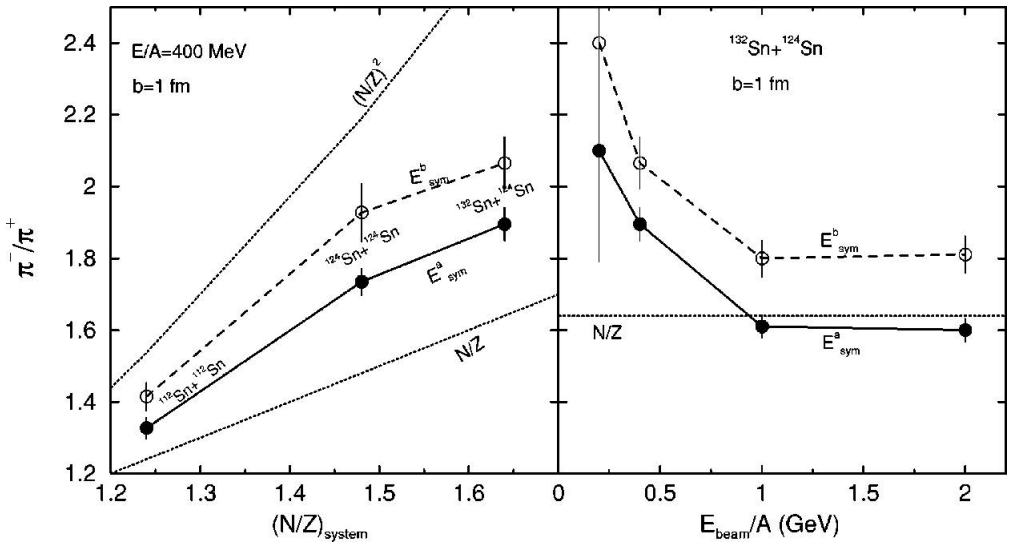


図 1.6　Sn+Sn 衝突系における、荷電パイオン生成比のアイソスピン非対称度及び入射エネルギー依存性 [13]。

特にパイオンの生成比は、SπRIT 実験で想定している反応の時間スケールにおいて、n/p 比などの他の粒子生成比よりも対称エネルギーの寄与を顕著に示すことが分かっている。図 1.6 中において、$E^a_{sym}$、$E^b_{sym}$ は

それぞれ Stiff な EOS、Soft な EOS を考えた際の対称エネルギーであり、以下のような形を用いている。

$$E^a_{sym}(\rho) = E_{sym}(0)\ \frac{\rho}{\rho_0}\ , \tag{1.10}$$

$$E^b_{sym}(\rho) = E_{sym}(0)\ \frac{\rho}{\rho_0} \cdot \frac{\rho_c - \rho}{\rho_c - \rho_o} \tag{1.11}$$

ここで、$\rho_c$ とは、$E^b_{sym}$ の符号が変化するときの $\rho$ の値である。

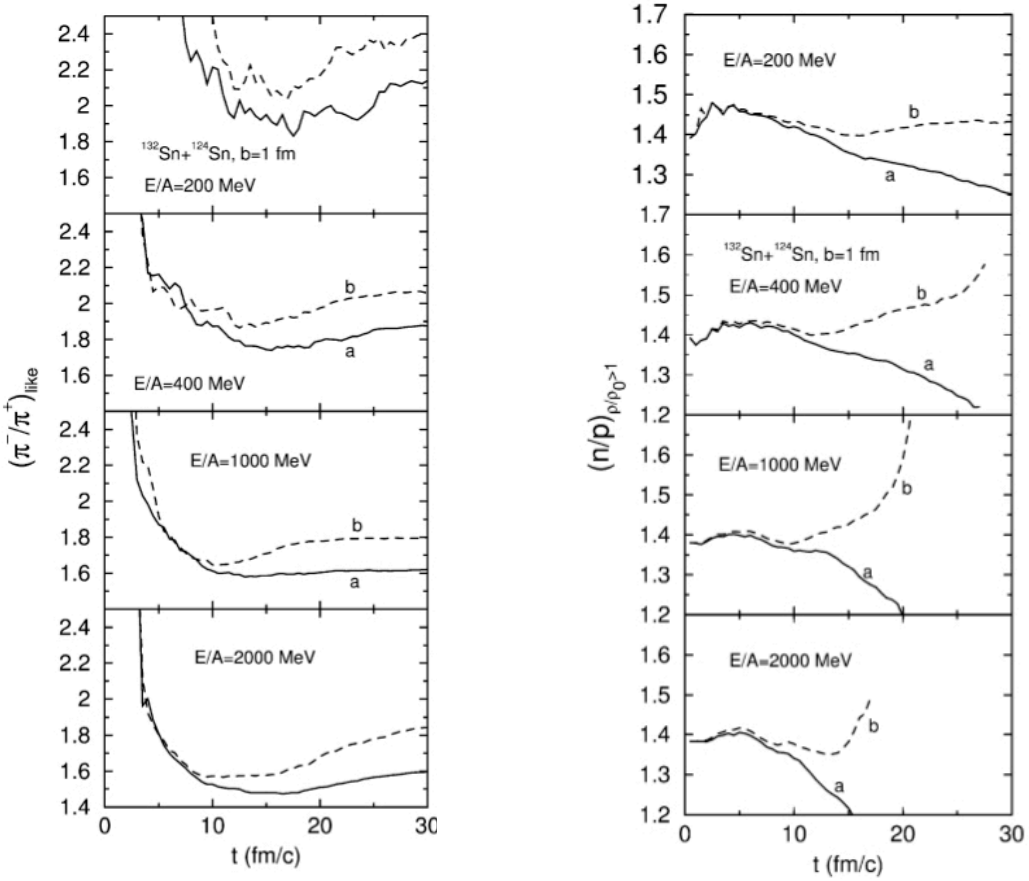


図 1.7　入射エネルギー毎、反応時間毎の荷電パイオン生成比 vs 中性子/陽子生成比 [14]。a, b は $E^a_{sym}$ と $E^b_{sym}$ に対応している。

### 1.3.3　SπRIT 実験の検出器群

SπRIT 実験では、上述の荷電パイオン比や n/p 比、t/$^3$He 比を測定するための TPC 及び中性子検出器をはじめとして、ビーム識別用のカウンターや DAQ 用のトリガー& VETO カウンターなどを併用して用いる。以下、各検出器の役割を簡単に紹介する。

## SπRIT-TPC

SAMURAI 電磁石内部に設置し、磁場を印可した状態で重イオン衝突によって生じる荷電粒子のトラッキング、粒子識別を行う。最大の役割は、対称エネルギーのプローブとなり得る正負パイオン生成比をはじめとした収量測定である。GET(General Electronics for TPC) と呼ばれる読み出しシステムを用いて DAQ を行い、重イオンビーム中での陽子やパイオンのトラッキング、1kHz の DAQ レートを目指す。電子のドリフト長は約 50cm であり、TPC 内部の電場を均一化させるために組み込まれているフィールドケージの内側が有感領域となる。TPC の外部筐体は 1cm 厚のアルミで枠組みが構築され、TPC 側面及び後面には Thin-Walled Enclosure と呼ばれる反応粒子を外部へ通過させるための薄い壁面を有する。現在、線源や宇宙線などによる動作確認、SAMURAI 電磁石へのインストールテスト等の準備が進められている。図 1.8 に SπRIT-TPC の内部構造を、表 1.1 に SπRIT-TPC の基本的なパラメータを示す。

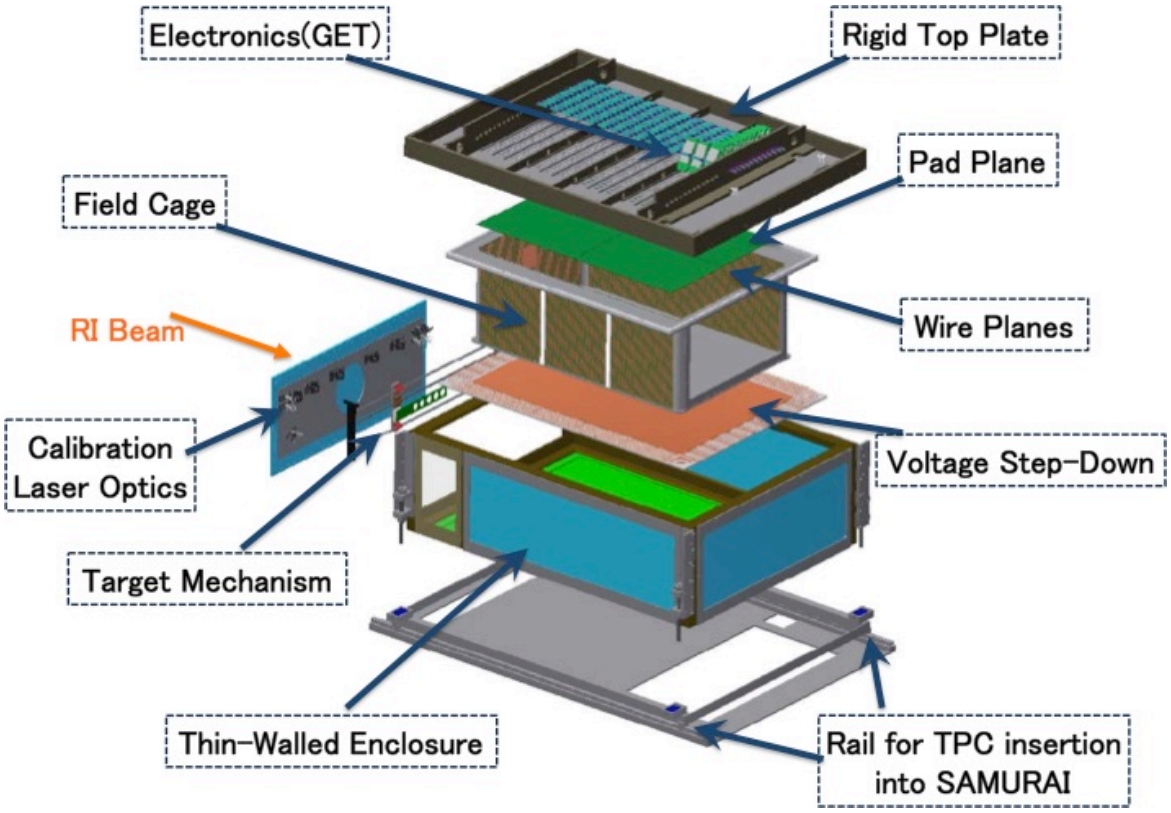


図 1.8　SπRIT-TPC のデザイン

表 1.1　SπRIT-TPC のパラメータ

| | | | |
|---|---|---|---|
| 全体サイズ | 2.1m × 1.5m × 0.7m | フィールドケージ | 1.5m × 1m × 0.5m |
| 読み出しパッド面 | 1.34m × 0.86m | 読み出しパッド数 | 12096 枚 (12mm × 8mm) |
| ドリフト長 | 49.57cm | ドリフト速度 | 5cm/$\mu$s |
| 印可電場 | 120V/cm | 印可磁場 | 0.5T |
| dE/dx range | Z=1-8 ($\pi$, p, d, t, He, Li, O) | トラッキングの分解能 | 2.5cm |
| 多重度限界 | 200 | ガス・圧力 | P10・1atm |

## NEBULA、NeuLAND

NEBULA は 180cm × 10cm × 10cm のシンチレータ 30 本を並べた構造を一層とし、VETO カウンター (1cm × 32cm × 190cm を 12 本並べる) 一層とシンチレータ 2 層が交互に二回繰り返した構造を有する、大立体角中性子検出器である。中性子に対する検出効率は約 40% であり、SAMURAI 電磁石後方に設置される。NeuLAND は GSI にて使用されていたトラッキング型中性子検出器であり、250cm × 5cm × 5cm のシンチレータを 50 本縦に積み重ねたものを一層とし、60 層を並べる (250cm × 250cm × 300cm をカバー)。運動量分解能 $10^{-3}$、位置分解能は 1.5cm を達成しており、複数の中性子を検出することにも優れ、1n の検出効率は 80% 以上である。SπRIT 実験のような重イオン衝突では、大量の中性子が放出されるため、SAMURAI 電磁石後方に設置したこれらの中性子検出器により、中性子の収量測定などを行う。

図 1.9　NEBULA の写真。

図 1.10　NeuLAND の写真。

TOF wall

SAMURAI 電磁石よりビーム上流に設置されたプラスチックカウンターと合わせて beam 識別のための TOF 測定を行う。

Hodoscope

重イオン衝突反応によって生じる核破砕片 (RI) を識別し、TPC 等と合わせて詳細な反応の再構成を行う。

Trigger & Veto detector

これらの検出器は TPC と共に電磁石内部に置かれ、重イオン衝突で生じる軽い荷電粒子や、重い核破砕片を検出し、トラッキングのトリガーや VETO を行う。SπRIT-TPC には、外部検出器のために Thin-Walled Enclosure と呼ばれる薄い壁面がビームに平行な両面とビーム後方側の面に備えられており、ターゲットと反応した粒子が壁面で止まってしまうことがないようにされているため、これらの Thin-Walled Enclosure を覆うような形で Trigger & Veto detector は配置される。

最後に、図 1.11 にビーム下流側に配置される検出器群の全体図を示す。

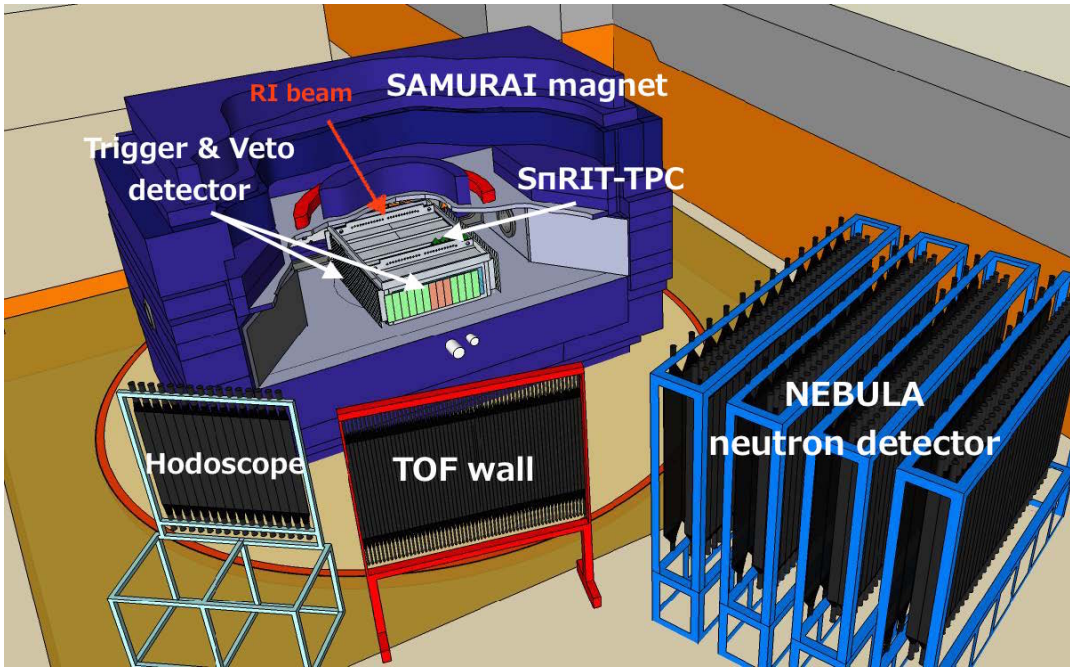


図 1.11　ビーム下流の検出器群。NeuLAND は NEBULA の上流側に配置される予定である。

## SπRIT 実験において用いるプローブ

SπRIT 実験においては、複数のスズ同位体ビーム・スズ同位体ターゲットの衝突系を用いる。スズを選んだ理由は、その陽子数が魔法数となっているために安定同位体の種類が多く、広い範囲の $\delta$ を衝突系において実現することができるからである。また、スズ原子核の半径は $R = r_0 A^{1/3}$ を用いると約 6fm であるため、高速の 70% 程度まで加速させたスズビームとスズターゲットの反応時間のスケールはおおよそ 10-20fm/c 程度である。図 1.7 によると、この反応時間スケールにおいてパイオン生成比が

より対称エネルギーの密度依存性に対してセンシティブであることが分かる。ターゲットとして用い得る安定なスズ同位体は $^{112}$Sn から $^{124}$Sn であり、RIBF において生成可能なスズ同位体ビームの種類は $^{108}$Sn から $^{132}$Sn である。以下に、現在予定されている衝突系及び入射エネルギーなどの組み合わせを表 1.2 に示す。

表 1.2　SπRIT 実験において用いる衝突系と入射エネルギー

| 一次ビーム | 二次ビーム + ターゲット | 入射エネルギー [MeV/A] | $\delta$ |
|---|---|---|---|
| $^{124}$Xe | $^{108}$Sn + $^{112}$Sn | 300 | 0.09 |
| $^{124}$Xe | $^{112}$Sn + $^{124}$Sn | 300 | 0.15 |
| $^{238}$U | $^{132}$Sn + $^{124}$Sn | 300 | 0.22 |
| $^{238}$U | $^{124}$Sn + $^{112}$Sn | 300 | 0.15 |

広範囲のアイソスピン非対称度を持つ overlap 部分 (核物質) の測定を行うことで、対称エネルギー項の寄与を探る。また、$^{112}$Sn+$^{124}$Sn の衝突系は、ビーム・ターゲットを入れ替えたときに依存性が見られるかを調べる。入射エネルギーは現在 300MeV/A のみの組み合わせが承認されているが、将来的には 200MeV/A のビームを用いて入射エネルギー依存性に関しても調べる予定である。入射エネルギーの違いは overlap 部分の密度を変えることに対応する。以上の衝突系からの粒子フロー、荷電パイオン生成比などを調べることで、核物質における対称エネルギーの密度依存性を系統的に測定する。

### 1.3.4　重イオン衝突の多重度

重イオン衝突事象を観測する上で、反応により生じた粒子数 (多重度) を知ることは非常に重要である。多重度は衝突事象の衝突係数と強い相関を持つことが分かっており、高密度領域が達成される原子核の overlap がどの程度生じたかが衝突係数に依存するためである。衝突係数の小さな事象は中心衝突、衝突係数の大きな事象は周辺衝突と呼ばれており、反応が中心衝突よりになるほど多重度は大きくなる。図 1.12 に中心衝突、周辺衝突の概念図を示す。

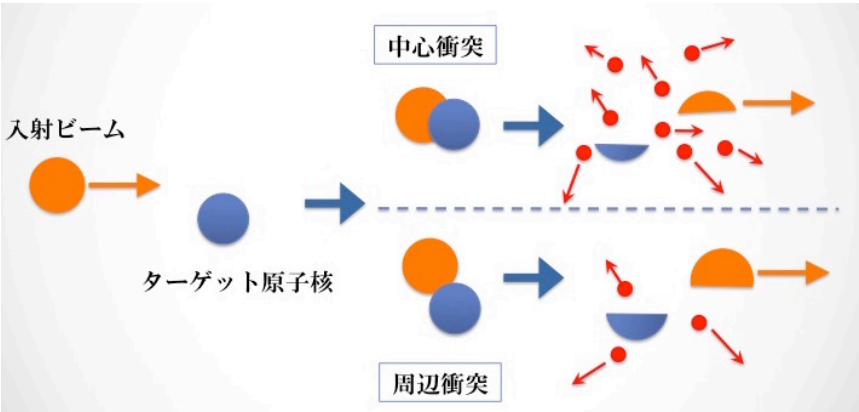


図 1.12　中心衝突、周辺衝突の概念図。

多重度の大きい事象ほど、対称エネルギーが寄与しうる overlap が大きくなるので、中心衝突事象ほど対称エネルギーの情報が粒子の収量比に残されていると考えられる。

RIBF のような重イオン加速器施設においては、ビームが実験エリアに到達するまでに複数の電磁石やデグレーダを通過するために、二次ターゲットにおけるビームの像はせいぜい直径数 cm である。そのため、衝突係数のような fm オーダースケールの物理量をモニターすることは困難であるが、多重度を測定することで間接的に衝突係数の推定が可能である。SπRIT 実験においては TPC 及び NEBULA 等の中性子検出器により最終的な多重度の決定を行うことになるが、すべての事象に対して DAQ を行うのではなく、中心衝突事象を選択的に取得する。これは、中心衝突事象に DAQ を限定することで、対称エネルギーをより明瞭に抽出する、SπRIT-TPC の dead time(∼1ms) により制限される DAQ レートを超えないようにする、という目的がある。

## 1.4 本研究の目的

本研究の目的は、TPC が中心衝突からの粒子を選択的に DAQ(トラッキング) するために、上述の多重度を検出し、中心衝突を選択するためのトリガーを生成するための検出器を開発することである。当該検出器 (多重度トリガーアレイ) の SπRIT 実験における意義は、主に以下のようなものがある。

- 対称エネルギーの情報を強く残していると考えられる中心衝突事象を選択的に得ることで、より明瞭に対称エネルギーの効果を測定することができる。
- TPC の dead-time による限られた DAQ レートを圧迫せずに、必要な事象を選択できる。
- データストレージの節約。

本稿は多重度トリガーアレイの開発に関して述べるものである。構成としては、第二章で多重度トリガーアレイを構築するための構成要素の説明を行い、第三章では SπRIT 実験において多重度トリガーアレイが発行するトリガーにより、イベント選別がいかに成されるかを示す。第四章では、HIMAC で行った、トリガーアレイを構成するシンチレータや読み出し回路の試験の報告を行い、第五章でその他に行った性能評価、第六章で結論、今後の方向性を述べる。

# 2　多重度トリガーアレイ Multiplicity Trigger Array

SπRIT 実験用多重度トリガー検出器は、スズビーム・スズターゲット衝突からの様々な荷電粒子を検出するために、押し出し型シンチレータを用いる。シンチレーション光はライトガイド (波長変換ファイバー) によって集光した後、光検出器 MPPC へ送られ、その信号読み出しを MPPC 専用の読み出し ASIC である EASIROC を搭載したモジュールにより行う。更に、モジュールに同時搭載されている FPGA によりトリガー信号の生成を行う。

この章では多重度トリガーシンチレータアレイの要求性能及び、構成する検出器や回路などに関して述べる。

## 2.1　要求性能

この検出器が SπRIT 実験において十分にその役割を発揮するためには、幾つかの基本的な要請がある。まず、磁場中で安定した動作が可能であることが挙げられる。上述のように、多重度トリガーアレイは SπRIT-TPC と共に、SAMURAI 電磁石の内部に設置して用いる。そのためには検出器自体が磁場の有無に関わらず、安定して動作することが求められる。また、磁場への影響が小さいものである必要がある。磁場への歪みが大きいと、TPC での飛跡のトラッキングなどに影響を及ぼすことが考えられる。そして、SAMURAI 電磁石内部の限られたスペースにおいて、他の検出器やケーブルと物理的に干渉しないようなジオメトリーを組むことも重要である。また、SπRIT-TPC はトリガー信号を認識した時点からドリフト電子の保持を始める。そのため、トリガー信号が遅すぎるとドリフト電子を取り逃して正確なトラッキングが不可能になる。これらの点から、トリガー生成にかかる時間は可能な限り短いほうが望ましいが、多重度トリガー以外のビームトリガーやビームの核破砕片に対するトリガーとの論理和によって最終的なトリガー信号は生成されるため、他トリガー検出器からの要請として、多重度を計算するロジック回路部分の遅延時間が約 80ns 以下であることが望ましいとされている。

以上のような性能を満たすように、部品の選定や性能評価を行った。

## 2.2　押し出し型シンチレータ (Extruded Scintillator)

トリガーアレイには、T2K 実験へ向けてアメリカの Fermi 研究所にて製造された押し出し型シンチレータを用いる。このタイプのシンチレータは既に T2K 実験において使用されたという実績があり、その性能評価も行われているが [15]、T2K 実験においてはニュートリノ観測が目的であり、SπRIT 実験においては陽子を主とする荷電粒子を検出することが目的であるという違いは考慮しなければならない。

シンチレータの組成としては、ポリスチレンベースに PPO、POPOP をそれぞれ質量比で 1%、0.01% 混合したプラスチックとなっており、表面には押し出し加工の際に酸化チタンベース (約 250$\mu$m 厚) の反射材コーティングが施される。このコーティングはシンチレータの集光効率を上げることと、光漏れによるシンチレータ間のクロストークを防ぎ、セグメント化を可能にするという目的があるが、この点においては考察が必

要であることが、本研究の性能評価で判明している。詳細は 5 章で述べる。シンチレータの中央には直径 2〜3mm 程度の穴が開けられており、ライトガイドである波長変換ファイバーを通して集光する。

シンチレータは反射材コーティングが側面に塗布された状態で 120cm × 5cm × 1cm の棒状に切り出されるが、SπRIT 実験においては SπRIT-TPC の側面部の Thin-Walled Enclosure(約 40cm × 150cm) をカバーするように、45cm の長さに切断して使用することにした。これを TPC の両側面に 30 本ずつならべることになるので、面積にして 45cm × 150cm をカバーする。図 2.1 にシンチレータの概略図を、図 2.2 に切断面を示す。図 2.2 を見ると、シンチレータ自体は完全な直方体ではなく、六角形の向かい合う二辺を引き延ばしたような端面を持っていることが分かる。また、反射材のコーティングも 45cm × 5cm の面の方が薄く、1cm × 5cm の面の方が厚くなっている。

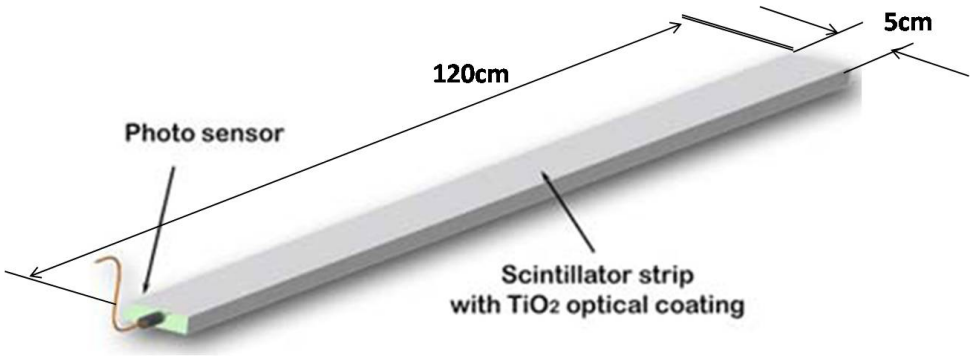


図 2.1　押し出し型シンチレータの概略図 [15]。ただし長さは 45cm に切断して用いる。

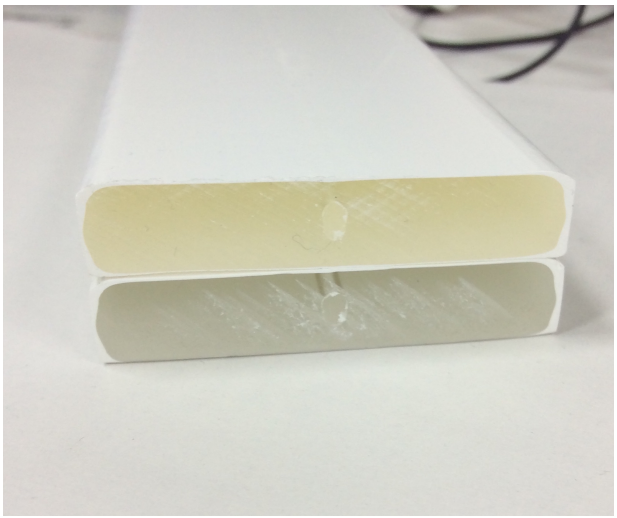

図 2.2　シンチレータ端面。面によって反射材コーティングの厚さは異なっている。

## 2.3　波長変換ファイバー

上述の押し出し型シンチレータに荷電粒子が入射した際に発生するシンチレーション光は、光検出器まで波長変換ファイバー (WaveLength Shifting Fiber:WLSF) によって伝送される。実機ではクラレ社の 1mm$\phi$ の Y-11(200)MS を使用する。Y-11(200) 型は青色領域に吸収波長、緑色領域に発光波長を持ち、シンチレータの発光波長、MPPC の量子効率の高い波長領域にほぼ一致する。図 2.3 にファイバーの吸収・発光波長の特性を示す。

ここで、WLSF の発光波長ピークはおよそ 470nm となっているが、この領域は吸収波長にも含まれているので、それほど伝播できない。そのため実際の発光波長のピークは 20〜30nm ほど高波長側にシフトして 500nm 程度になる。430nm の励起光をファイバーに入射したときのファイバー端面からの伝送光スペクトルを図 2.4 に示す。

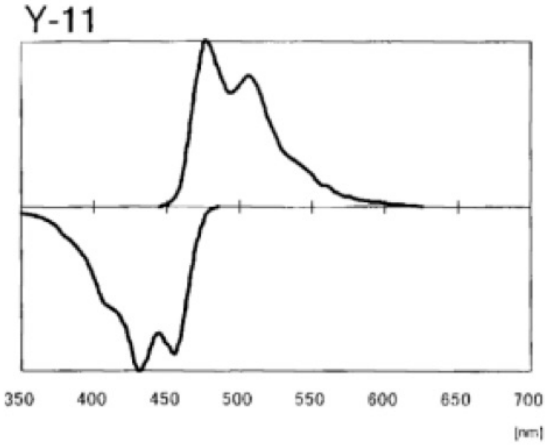


図 2.3　Y-11 の吸収・発光波長の特性曲線。上方が発光波長、下方が吸収波長のスペクトルを示す。

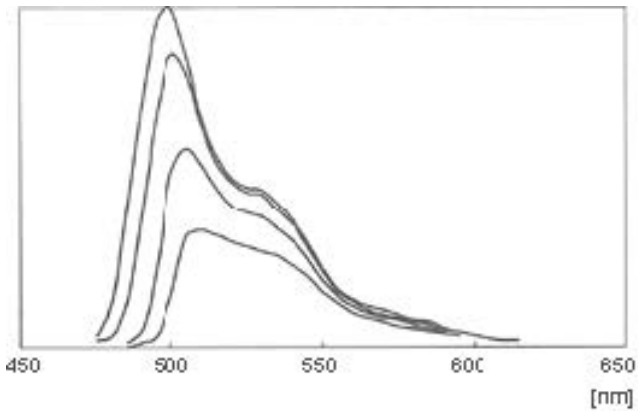


図 2.4　430nm の励起光をファイバーに入射したときの発光スペクトル。励起光入射位置の光検出位置からの距離毎に示してある。

Y-11 というのは波長変換材の種類を示しており、(200) は変換材の濃度とファイバー径の積を取った量 (ppm·mm) を表している。最後の MS はマルチクラッド S 型という意味であり、ファイバーの物理的な構造を示している。マルチクラッドとは、ファイバーのコアの外側に二重にクラッド層をもつタイプであり、シングルクラッド型のものと比べてファイバー内での再発光した光の全反射条件を満たす角度が大きくなる。そのため伝送効率はシングルクラッド型よりも高くなり、光量としてはシングルクラッド型と比べて約 50% 大きくなる。マルチクラッド型の core、inner cladding、outer cladding の屈折率はそれぞれ、1.59、1.49、1.42 である。S 型は、ファイバーのコアを構成しているポリスチレン分子の向きが揃っているタイプであり、分子の向きが揃っていない標準型 (non-S 型) に比べて、曲げに強いという性質がある。しかし、non-S 型は光学的に等方であるために光の減衰は少なく、S 型の方が減衰長としては短くなる。

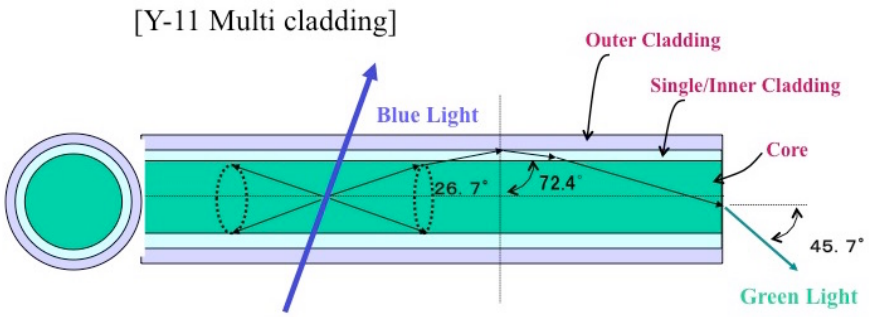


図 2.5　ファイバーの断面図、マルチクラッド型の概略。

## 2.4　Multi Pixel Photon Counter : MPPC

MPPC は浜松ホトニクス社によって開発された半導体光検出器である。MPPC は PPD(Pixelated Photon Detector) の一種であり、受光面にはピクセル状に APD(Avalanche Photo Diode) が多数並んだ構造をしている。以下に、MPPC のもつ基礎特性を述べる。

- 優れたフォトンカウンティング能力
- コンパクトな形状
- 磁場の影響を受けない
- 低バイアス電圧動作 (〜70V)
- 高いゲイン (〜$10^6$)・光子検出率を持つ

SπRIT 実験においては検出器が磁場の影響を受けないことが必須条件であり、ファイバーからの光を検出する上ではコンパクトな MPPC が適切である。

### 2.4.1　MPPC の動作原理

まず、APD の動作原理を簡略に述べる。APD はダイオードに逆バイアス電圧をかけることで生じる空乏層において、ドリフトする電子 − ホール対のキャリアを雪崩増幅させることで信号の強度を増加させる仕組みを取る。APD にはノーマルモード、ガイガーモードの二種類の動作モードが存在するが、MPPC においてはガイガーモードを採用している。以下に各モードの特徴を記す。

1. ノーマルモード
   - ブレイクダウン電圧以下での動作
   - ゲイン $< 100$
   - APD へ入射した光子数に比例した高さの信号を出力

2. ガイガーモード
   - ブレイクダウン電圧以上での動作
   - ゲイン $\sim 10^6$
   - APD へ入射した光子数に依存しない、電圧に依存する定出力

ブレイクダウン電圧というのは、APD がノーマルモードとガイガーモードで切り替わるときの電圧値であり、MPPC において典型的な値は約 70V である。一つの APD 素子から出力される電荷量 Q は、印可する逆バイアス電圧を $V_{bias}$、素子のキャパシタンスを C、ブレイクダウン電圧を $V_{bd}$ として、以下のように表される。

$$Q = C(V_{bias} - V_{bd}) \tag{2.1}$$

Q は APD に入射する光子数に依らず、逆バイアス電圧 $V_{bias}$ の関数となっている。C や $(V_{bias} - V_{bd})$ の典型的な値はそれぞれ、数十〜数百 fC、1.0〜1.5V 程度であるので、Q は数十 fC〜数百 fC となる。このとき、一つの光電子 $(1.6 \times 10^{-19}\mathrm{C})$ が増幅されたものが Q であるので、APD の典型的なゲインは $10^6$ 程度である。

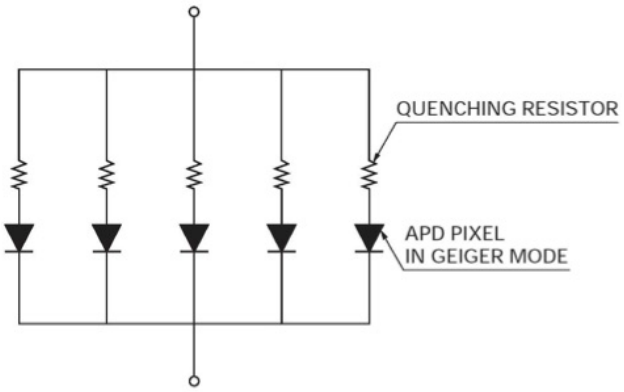


図 2.6　MPPC の動作原理の概略。各 APD ピクセルは並列に接続され、等しい増幅度を持つために、光子の入射したピクセル数と増幅度に比例した信号が得られる [16]。

MPPC はこの APD がピクセル状に並んでおり、典型的には 1mm × 1mm や 1.3mm × 1.3mm の MPPC 受光面に対して、25$\mu$m × 25$\mu$m、50$\mu$m × 50$\mu$m、100$\mu$m × 100$\mu$m 等の面積をもつ APD が敷き詰められた構造をしている。すべての APD は並列に接続されているために各 APD には同じ電圧値がかけられ、APD 出力信号の総和が MPPC の信号として読み出される。MPPC 動作原理の概略図を図 2.6 に示す。結果として、MPPC の出力電荷量 $Q_{total}$ は、以下のように表される。

$$Q_{total} = N_{fired} \times Q \tag{2.2}$$

ここで、$N_{fired}$ は光子が入射した APD 素子の数である。MPPC はすべての APD がガイガーモードで動作するため、ピクセル状に並んだ APD 素子の総数よりも入射してくる光子の数が十分少ない、つまり受光したピクセルの数と入射光子数が等しい様な場合において、優れたフォトンカウンティング能力を示す。S$\pi$RIT 実験において用いる MPPC は、1.3mm × 1.3mm の受光面に 50$\mu$m × 50$\mu$mAPD が敷き詰められたセラ

ミック型のタイプであるため、一つの MPPC には 667 個の APD 素子が乗せられている。図 2.7 に MPPC 受光面の写真を示す。

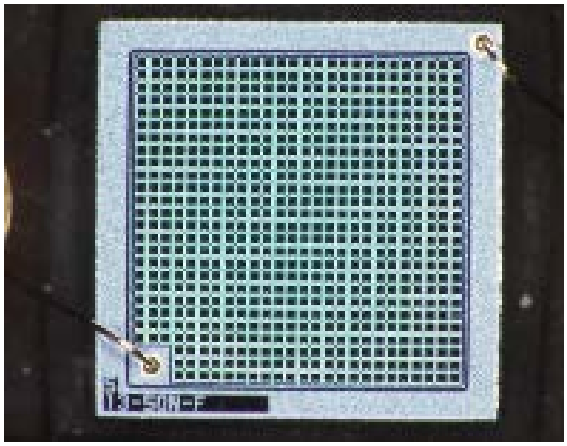

図 2.7　1.3mm × 1.3mmMPPC 受光面の顕微鏡写真 (150 倍)[16]。

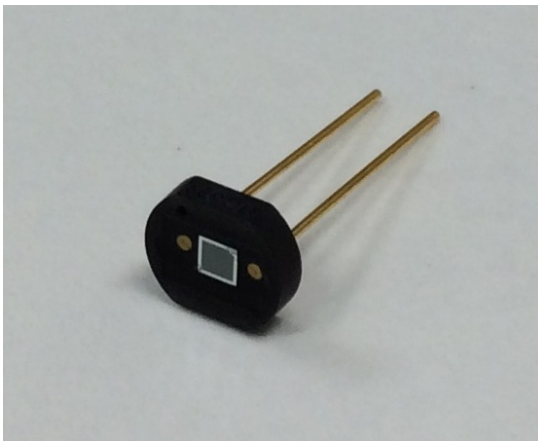

図 2.8　実機に用いるセラミック型 MPPC。

また、APD は温度依存性が大きいため、MPPC は上述の $(V_{bias} - V_{bd})$ と使用時の温度に依存した特性を示す。

### 2.4.2　MPPC のノイズ特性

MPPC に見られるノイズの成分とその特徴を箇条書きで記す。

- 熱電子ノイズ
  MPPC の各 APD 素子において、素子内部の電子が熱的運動により束縛を離れてしまい、ガイガー放電を引き起こすことがある。MPPC の光子検出法は光電子由来のガイガー放電であるため、光子由来の信号と熱電子ノイズによる信号は基本的に区別できない。熱電子ノイズの波高は 1-2 photo electron 程度であり、各 APD 素子においてランダムに発生する。熱電子ノイズのノイズレートも使用環境の温度と $(V_{bias} - V_{bd})$ に依存する。

- クロストーク
  クロストークとは、ある APD 素子がガイガー放電を起こした際に二次的に生じる光子が、隣接する APD のガイガー放電のトリガーとなってしまい、得られる信号が実際に検出した光子数に比べて見かけ上増加して見える現象のことである。これにより、MPPC 出力の線形性やダイナミックレンジに悪影響を及ぼすことになる。クロストークの起きる割合をクロストークレートと呼ぶことにすると、クロストークレートの典型的な値は 0-30% である。

- アフターパルス
  アフターパルスとは、一つの APD 素子において雪崩増幅された電子の一部が素子内部の格子欠陥に一定時間トラップされ、再び放出される際にガイガー放電のトリガーとなってしまう現象のことである。

アフターパルスも MPPC の光子数検出において悪影響を及ぼす。
また、クロストークとアフターパルスは MPPC 単体において区別して扱うことは非常に難しく、APD 素子単体でのアフターパルスの評価と組み合わせる必要がある。

上述の熱電子ノイズ、クロストーク、アフターパルスは並列に起こりうる現象であり、実際の MPPC のノイズは 4〜5photo electron 程度のものも存在する。つまり、多重度を正確に検出するためには少なくとも、軽粒子がシンチレータに入射したときに生じるシンチレーション光が、波長変換ファイバーによって MPPC に伝送されるとき、このノイズ成分を十分に分離できる程度の光子が検出できなければならない。

また、これらの特性もゲインと同様に温度依存性、バイアス電圧依存性を持つ。典型的なこれらの特性に関する数値を表 2.1 にまとめておく [15]。

表 2.1　25°C における MPPC の基礎的特性

| $(V_{bias} - V_{bd})$ [V] | ゲイン | C.t & A.p レート | 1p.e. ノイズ [kHz] | 2p.e. ノイズ [kHz] |
|---|---|---|---|---|
| 1.0 | $5.7 \times 10^5$ | 0.10 | 372 | 22.6 |
| 1.2 | $6.8 \times 10^5$ | 0.15 | 450 | 35.7 |
| 1.3 | $7.3 \times 10^5$ | 0.17 | 490 | 47.9 |
| 1.4 | $7.9 \times 10^5$ | 0.20 | 530 | 61.6 |
| 1.6 | $8.9 \times 10^5$ | 0.26 | 616 | 87.7 |

### 2.4.3　GOMI コネクタ

GOMI(General Optical MPPC Injection) コネクタは MPPC 受光面と波長変換ファイバーの端面を正確にアラインメントさせることで、MPPC の受光効率をよくするためのキャップ式コネクタである。これは T2K 実験向けに製造されたものであり、ファイバー側コネクタと MPPC 側コネクタの着脱の再現性などが既に評価されている [16]。

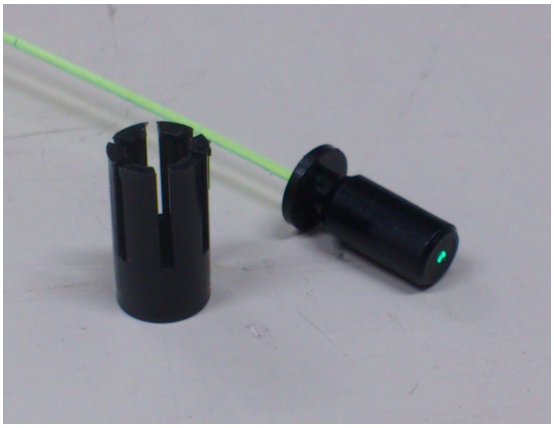

図 2.9　GOMI コネクタの写真。左が MPPC 側コネクタ、右がファイバー側のコネクタであり、ファイバーを通してある。

GOMI コネクタの特徴としては、以下のような性能が挙げられる。

- ファイバー端面の中心と、MPPC 受光面の中心が正確に一致すること
- ファイバー端面と MPPC 受光面が可能な限り近づけられること
- 着脱の再現性が取れる
- 着脱が容易であり、コンパクト

ここで、着脱による再現性の評価では、光量の誤差で 3% 以内に収まっている。

## 2.5 EASIROC

EASIROC とは Extended Analogue Silicon-pm Integrated Read Out Chip の略称であり、フランス LAL 社 Ω グループが開発したシリコン型 PM(Photo Multiplier) 読み出し専用の ASIC である [17]。チップ一枚に付き 32 チャネルの入力を持ち、各チャネル毎に ASD(Amp-Shaper-Discriminator) 回路が実装されている。特徴的なのが、信号線と接続された inputDAC と呼ばれる 0-4.5V 出力により各チャネルのバイアス電圧微調整を可能にしている点である。最近では、EASIROC を応用・開発したものが MPPC の読み出し方法としてよく使用されている。

図 2.10 に 1 チャネルのアナログ回路図を示す。図 2.10 の上部二段は電荷測定用の回路になっており、シリコン PM からの正電圧入力が二つのコンデンサにより High Gain : Low Gain = 10 : 1 の割合で分岐される。その後に置かれた PreAmp(増幅率 10 -150 倍) により信号は増幅され、波形成形増幅器 SlowShaper(時定数 25ns -175ns) に送られる。成形後の信号は、外部から入力される HOLD 信号のタイミングで決まる、ある瞬間の電圧値が更に後方のコンデンサに保持される。32 チャネル分の保持された電圧値は、スイッチングにより外部へと出力される。この値を A-D 変換などにより電荷情報を読み出す。High Gain 側には、時間測定用の回路として、Bipolar Fast Shaper(時定数 15ns) が置かれており、波形成形後の信号は Discriminator に送られる。その後、各チャネル毎の Discriminator 出力がスイッチングにより外部へと出力され、タイミング情報として TDC 等で読み出すことが可能である。以上のアンプ増幅率、シェイパーの時定数、ディスクリミネータの閾値などは register によりそれぞれ、32 チャネルで共通の値を設定する。

また、EASIROC に信号が入力した直後の信号線に 8-bit DAC が接続されているが、これがいわゆる inputDAC であり、MPPC のバイアス電圧をチャネル毎に微調整するための DAC である。この機能は、その基礎特性がバイアス電圧に強く依存し、各機が個性をもつ MPPC のオペレーションにおいては重要な機能である。

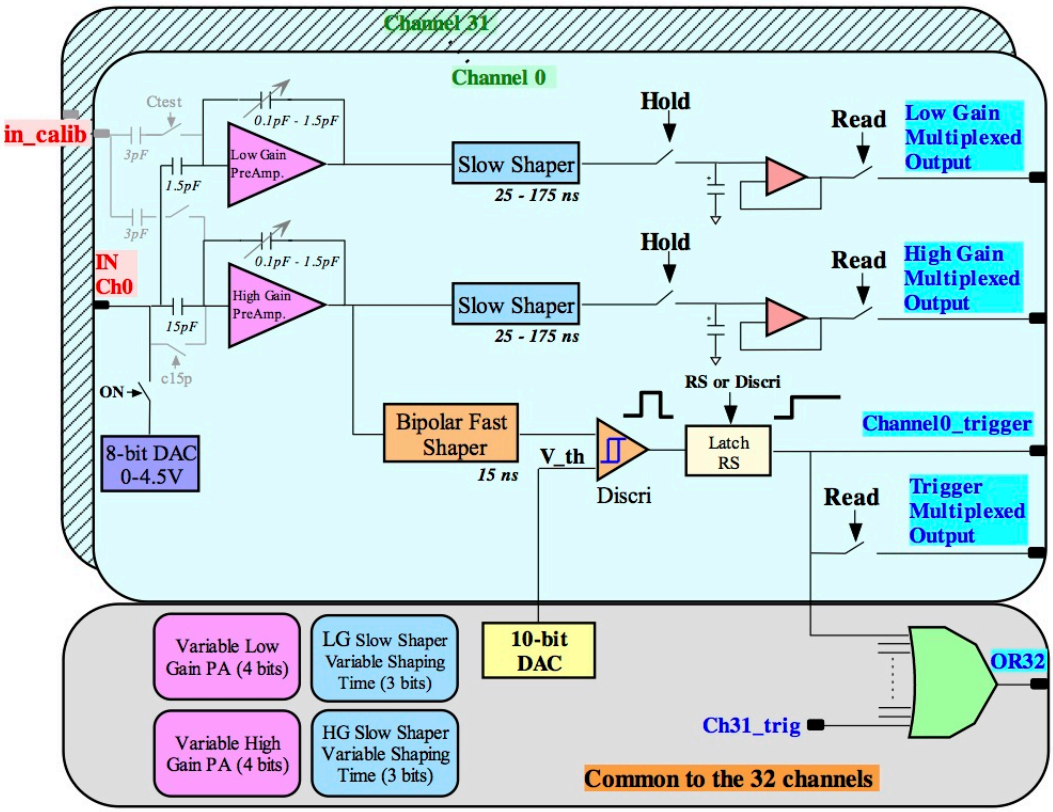


図 2.10　EASIROC 内部の 1ch アナログ [17]。

### 2.5.1　EASIROC MODULE

上述の EASIROC をより汎用的に扱うために NIM モジュール化したものが、大阪大 -KEK によって開発された EASIROC MODULE である [18]。MPPC を用いるために必要な基本的機能のほぼすべてが実装されており、このモジュール単独で MPPC のオペレーションが可能である。以下に EASIROC MODULE のもつ特徴を述べる。

- EASIROC を二枚搭載、FPGA により制御を行う
  64 チャネルの MPPC を同時駆動させることが可能である。EASIROC の基本的な機能は上述の通りであり、FPGA により register の書き換えを行う仕様である。

- 64ch 共通の MPPC バイアス電源
  MPPC バイアス電圧印可用に小型電源がボード上に搭載されており、外部電源との切り替えも可能となっている。

- SiTCP を実装し、Eternet を介して外部 PC による FPGA 制御が可能

EASIROC MODULE の各種パラメータは FPGA を介して変更可能であるが、SiTCP を実装して Ethernet 通信による FPGA 制御 (Slow Control) を可能としている。PC 側のソフトウェアは C/C++ 言語等によって書かれており、編集の自由度も高い。これにより EASIROC 制御、DAQ、MPPC に印可される電圧値の制御及び、電流、温度 (温度トランスデューサなどが必要) のモニター等が可能となっている。

- EASIROC 出力の電荷情報を 12bitADC により取得可能
  EASIROC MODULE にはボード上に ADC が実装され、EASIROC の電荷情報出力 (High Gain or Low Gain) と接続されている。外部からの HOLD 信号によって保持された電圧値を ADC によって読み出すことが可能。また、アナログ信号は外部 NIM 出力にも繋がっているため、HOLD のタイミングはオシロスコープなどにより確認が可能である。

- EASIROC の Discriminator 出力を LVDS または FPGA へ接続
  各チャネルの Discriminator 出力は、LVDS 出力にパラレルに送られている。これを外部 TDC を用いて時間情報を得ることも可能だが、FPGA 内部に TDC を実装させて、時間情報を得ることも可能である。また、FPGA 内部に回路を実装してトリガー出力を形成することも可能であり、SπRIT 実験においては FPGA 上に多重度トリガー回路を実装する。

- モジュール自体の電源は NIM、もしくは AC アダプタ (+6V)
  NIM ビンに挿すことなく使用することも可能である。

図 2.11 に EASIROC MODULE の内部基板を示す。本研究においては主に、線源や宇宙線によるシンチレータや WLSF の性能評価に EASIROC MODULE を用いた。また、NIM ビンとのコネクタ部分が磁性体であることが分かっているが、いずれにせよ SAMURAI 電磁石内部に置いて使用する際には AC アダプタ電源を用いることになるので、NIM ビンとのコネクタは外して用いることを考えている。また、FPGA の焼き直しには J-TAG コネクションの専用ケーブルが必要であるが、電磁石内部に配置して用いることを考えると、Ethernet のみですべての制御が可能であることが望ましく、原理的には Ethernet を介しての焼き直しが可能なはずである。この点においても方法を模索する必要がある。

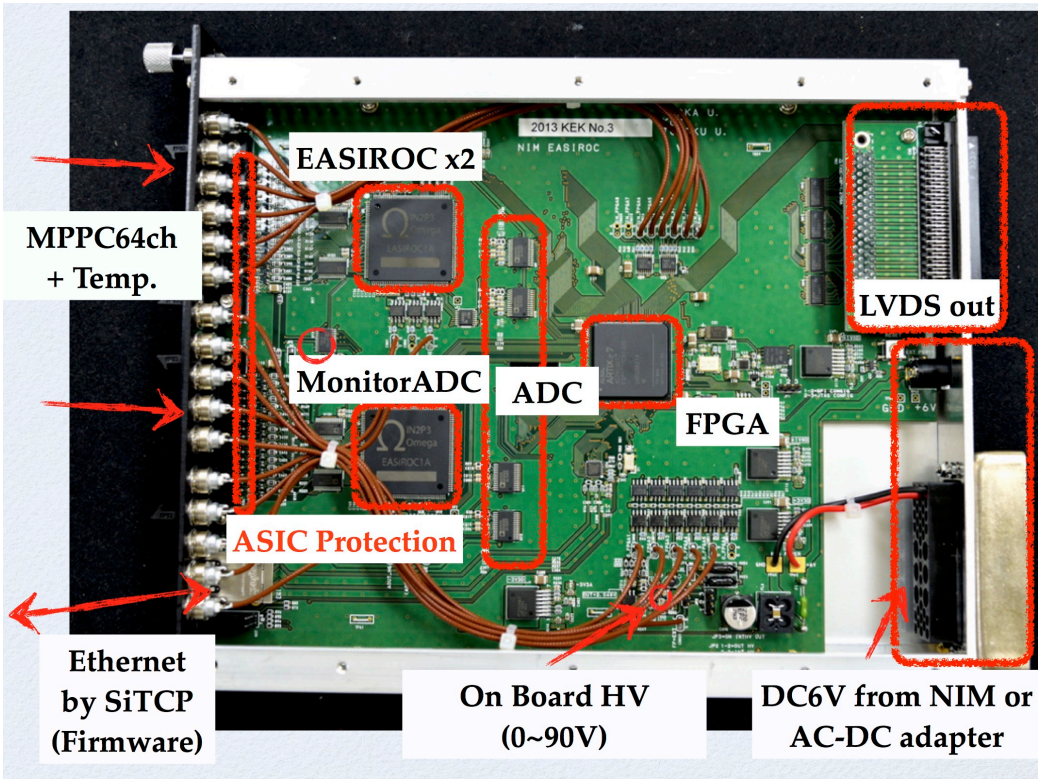


図 2.11　EASIROC MODULE 内部基板の概観 [18]。

### 2.5.2　VME EASIROC Module

つい最近、東北大-KEK で VME モジュール化に成功したのが VME EASIROC Module(簡易的に今後は VME EASIROC と呼ぶ) である。EASIROC MODULE 同様、二枚の EASIROC チップを搭載した 64 チャネル MPPC 読み出しが可能であり、SiTCP/Ethernet を介した FPGA による制御を行う。基本的な仕様は大阪大の EASIROC MODULE と変わらないが、異なる点としては以下のようなものがある。

- MPPC バイアス用電源は外部より供給する
- 時間情報の外部出力はないが、デフォルトで FPGA に 1ns 制度の MHTDC が実装される
- VME 6U サイズで J1 コネクタによりモジュール電源を取得
- Ethernet を介した FPGA の焼き直しが可能
- 通常、KEK 規格の J0 バスを用いて、2 level trigger、fast clear、ADC 用の HOLD、イベントタギング、busy を動作させる

またモジュール前面の I/O が大きく異なり、VME EASIROC は 64 チャネル MPPC パラレル入力、二種類の EASIROC 内部のアナログ出力 (あるチャネルの High Gain 側の波形成形した信号と任意の信号線の信号を得れる Probe)、PeakHoldADC 用の HOLD 信号入力、MHTDC 用の common stop 入力、selectable logic と呼ばれる、あるチャネルの EASIROC Discriminator 出力、多重度トリガー出力の 6 種類の NIM I/O が備えられている。現時点で Ethernet による FPGA の焼き直しが可能となっており、実機として優良な候補である。

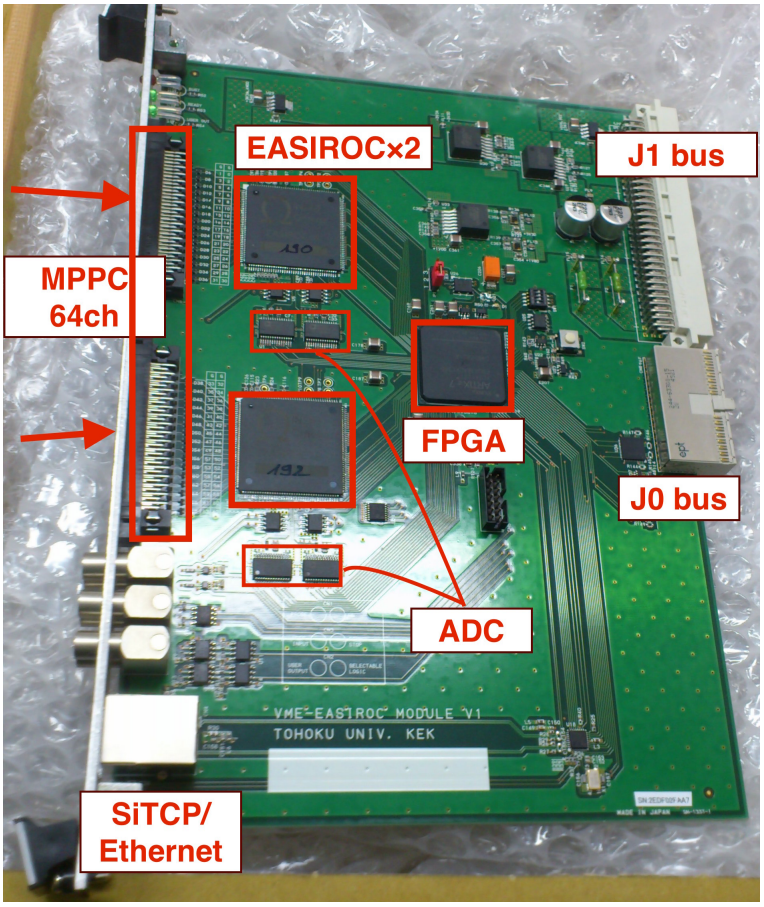


図 2.12　VME EASIROC の内部基板。

### 2.5.3　多重度トリガー生成のためのロジック回路

今回多重度トリガーアレイを構築する上で、その根幹になる部分の一つがこの多重度トリガーを生成するための回路開発である。上述の通り、トリガー生成回路は EASIROC を搭載しているモジュールに乗せられている FPGA に電子的に書き込む。今回は Ethernet ケーブルを用いた FPGA の書き換えが成功しているという実績から、東北大の VME EASIROC 開発者である三輪氏、塩崎氏のスキームの下、VME EASIROC 上の FPGA に回路を実装した。

図 2.13 に多重度トリガー生成のためのロジック回路の簡略図を示す。まず、二枚の EASIROC チップの

64bit Discriminator 出力を 8 bit ずつに区切り、それぞれに ROM を用意した。ROM には、8bit 入力すべての組み合わせに対する多重度の計算結果をあらかじめ書き込み、8bit の入力に対して、各計算結果を直接に出力させるようにした。このモジュール (ROM) を置いた理由は、すべての計算を adder 回路でさせるよりも時間が短縮できると考えたことと、8bit の組み合わせを考えると $2^8 = 256$ 通りあり、これより大きな ROM を書くことに対する手間を考慮したためである。その後、それぞれの ROM の出力を D フリップフロップ回路を挟むことで信号を同期した後、2bit adder 回路で足し上げる。8 つの ROM 出力を 2bit adder 回路のみで足し上げるには三段階の計算が必要であるので、D フリップフロップ + 2bit adder 回路を三段準備し、64bit の Discriminator 出力から多重度を計算するようにした。

以上の計算結果がある数 (multiplicity threshold と呼ぶ) 以上であるときにトリガーロジック出力として負論理 NIM 信号を生成するために、Comparator 回路を置いた。multiplicity threshold は slow control によって制御できるようにした。

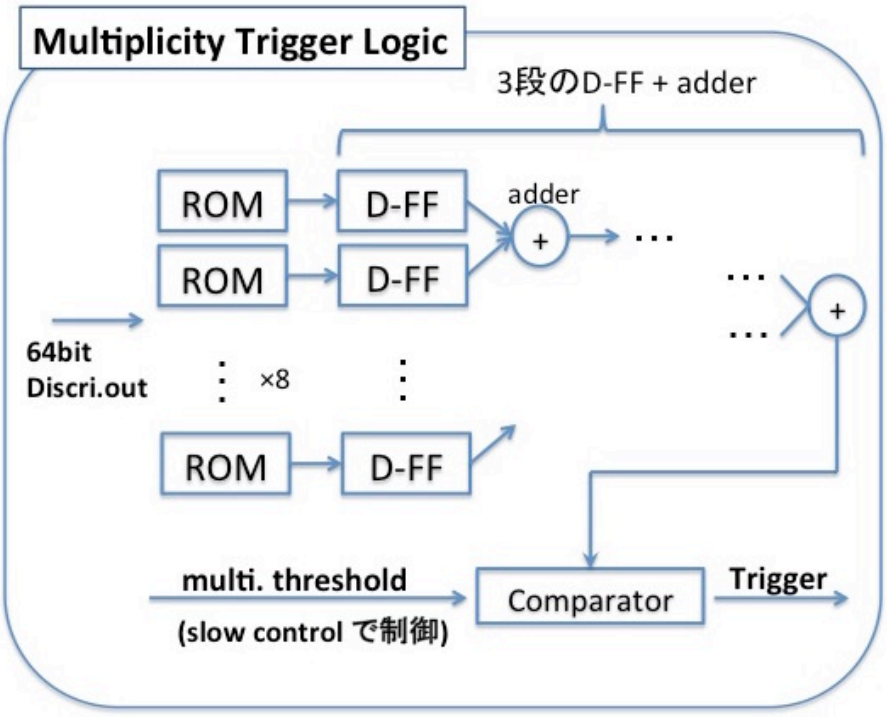


図 2.13　多重度トリガー生成のためのロジック回路の略図。

### 2.5.4　多重度トリガーロジック部における遅延時間の簡易測定

この回路による遅延時間を調べるために、東北大にて VME EASIROC に回路を実装した後、Function Generator とオシロスコープを用いた簡易テストを行った。簡易テストの概要図を 2.14 に示す。

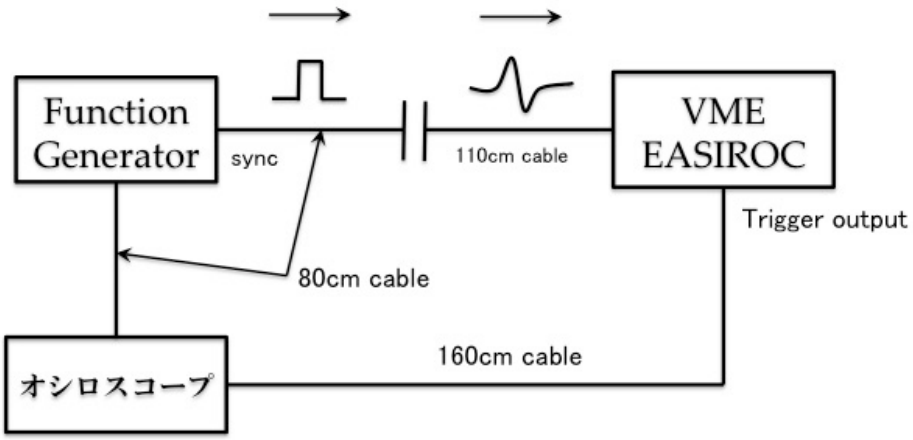


図 2.14　遅延時間簡易測定の概要図。

まず、Function Generator から 20ns 幅で 1kHz のパルス信号を出力させ、その通常出力とその sync 信号の時間差を測定したところ、sync 信号が約 12ns 遅れていることが判明した。信号のタイミングとしては、オシロスコープで見られる波高の 1/2 の時点を取っている。そのオシロスコープの様子を図 2.15 に示す。この sync 信号をコンデンサに通すことで擬似的な MPPC 出力信号を作成し、約 1.1m のフラットケーブルを通した後に VME EASIROC へ入力させる。本テストでは sync 信号を 4 つに分岐し、それぞれにコンデンサを通して多重度 4 の疑似信号を入射した。VME EASIROC からの多重度トリガー出力信号は約 1.6m のケーブルでオシロスコープの入力へ接続した。その結果、オシロスコープで得られた入力信号と多重度トリガー信号の波形を図 2.16 に示す。

Function Generator からの通常出力と sync 信号の時間差 12ns、ケーブル長による遅延 (約 13.5ns) を考慮すると、上述の多重度トリガー生成回路を用いた VME EASIROC が入力信号を受け付けてから、トリガー信号を出力させるまでにかかる遅延時間は約 52ns であることが分かった。これは要求性能の範囲内であるが、他の回路に関しては実装、遅延時間測定は行っていないため、更なる最適化は可能であると考えている。ここで、図 2.16 の多重度トリガー信号を見ると 4ns 程度の jitter が見られるが、これは回路の内部に D フリップフロップを組み込んでいるためであり、そのクロック周波数 300MHz と consistent な振る舞いであるといえる。

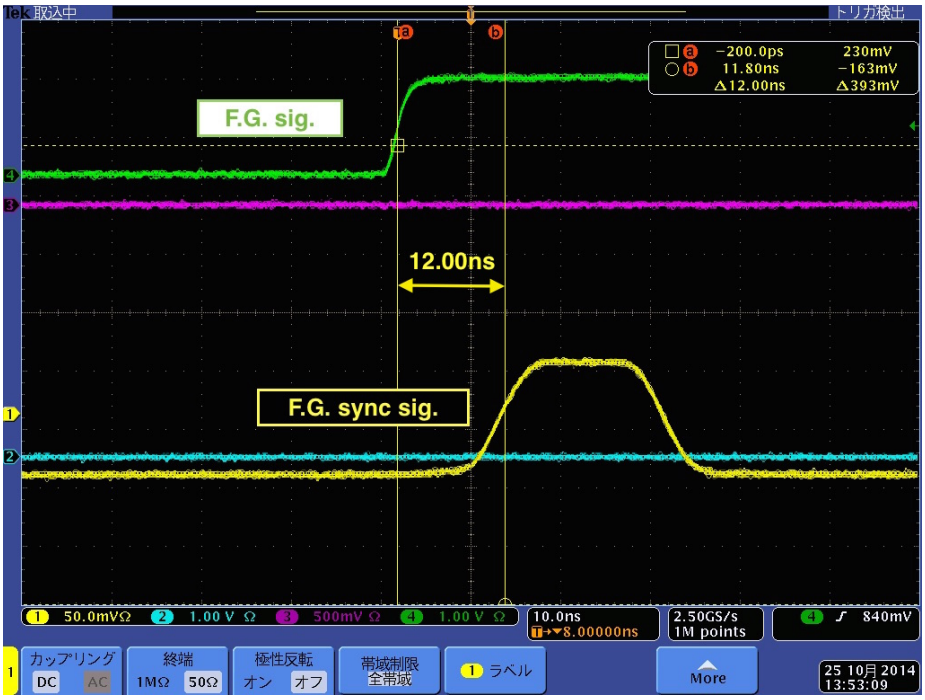


図 2.15　オシロスコープによる Function generator からの出力。SYNC 信号をコンデンサを通して MPPC 信号として用いる。

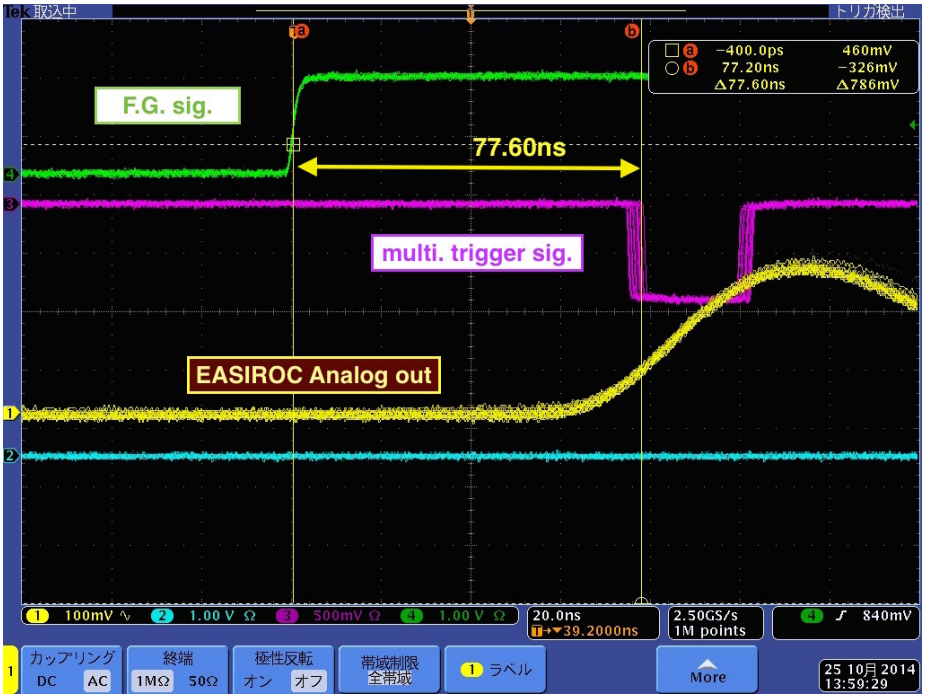


図 2.16　オシロスコープによる多重度トリガー生成にかかる遅延時間測定。

# 3　シミュレーション

多重度トリガーアレイが SπRIT 実験においてどのようにイベント選別を行うのかを見積もるために、GEANT4 を用いてジオメトリを再現し、イベントの生成は UrQMD モデル計算による結果を使用してシミュレーションを行った。UrQMD とは Ultrarelativistic Quantum Molecular Dynamics の略称であり、Fermi ガス模型を考慮した分子運動論に基づく微視的輸送モデルである。主に、LHC や BNL-RHIC などの高エネルギー重イオン衝突現象におけるシミュレーションに用いられている。

今回用意したイベントは 300MeV/A での $^{132}$Sn(ビーム) + $^{124}$Sn(ターゲット) の衝突系である。衝突係数 b=0 -12fm の範囲でランダムに衝突が起こり、各イベント毎に反応後に生じる粒子の種類と位置、運動量などが計算される。この結果を GEANT4 のイベントジェネレータとして用い、SAMURAI 電磁石により 0.5T の磁場が印可された条件下において粒子輸送計算を行った。

GEANT4 によるジオメトリは、SπRIT 実験において想定されている SπRIT-TPC のフィールドケージ及び、(Thin-Walled)Enclosure、多重度トリガーアレイのシンチレータを配置した。図 3.1 に本シミュレーションの視覚化されたジオメトリを示す。

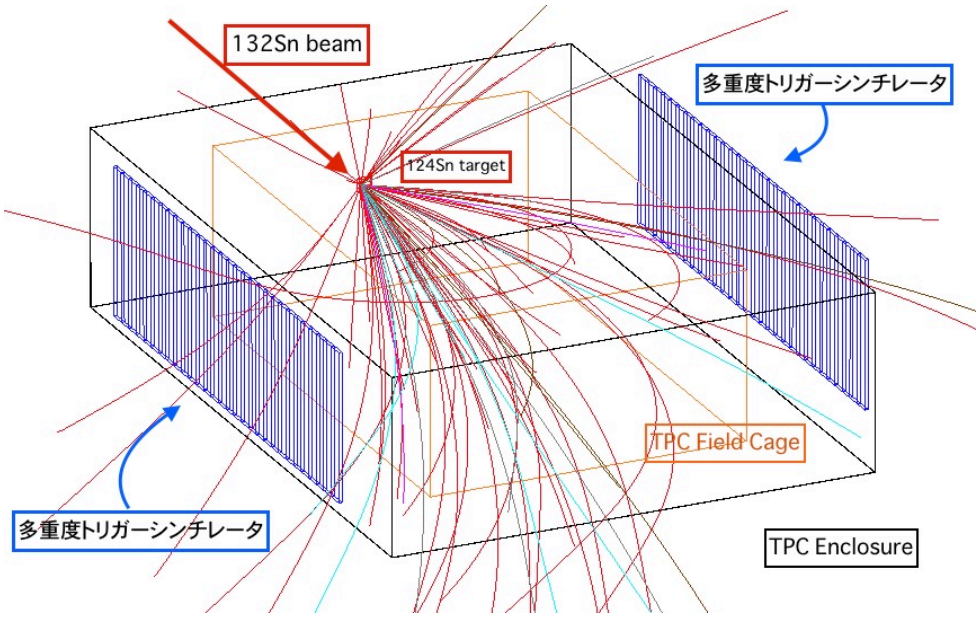


図 3.1　GEANT4 により視覚化されたシミュレーションのジオメトリー。

ここでビーム軸を z 軸 (x=y=0)、$^{124}$Sn ターゲットの位置を (0,0,z=0) とする。簡単のため、Thin-Walled Enclosure 部分は作成せず、TPC Enclosure は厚さ 1cm のアルミニウム板で構成し、サイズは 200.98cm × 147.74cm × 53.95cm と設定した。フィールドケージは図中に示されているが、物質等の特別な定義はされて

いないため、シミュレーションの中では相互作用は生じない。シンチレータ一本のサイズは 5cm × 1cm × 45cm であり、TPC 両側面の実機における Thin-Walled Enclosure を覆うように、片面 30 本ずつ配置されている。具体的なシンチレータアレイの位置は y=−22.5-22.5cm、z=20-170cm を覆い、TPC 側面から 7cm の距離を取っている。これは、TPC を電磁石内部に装入するために用いるレールとシンチレータを固定するためのサポータ、その他の検出器等が干渉しないようにするために暫定的に取ったスペースである。

以上の条件の下で輸送計算を行い、各イベント毎に粒子がヒットしたシンチレータの本数を調べた。ここでは、荷電粒子がシンチレータを通過したことをヒットの条件とし、シンチレーション光の減衰や MPPC の検出効率などは考慮していない。得られた結果から、多重度トリガーとしてヒット本数の閾値を変えながら (多重度≧ 3, 5 , 7 , 9 ) ヒストグラムを重ねて得られたのが図 3.2 である。横軸は衝突係数であり、多重度の閾値を上げるほど、UrQMD の入力生データから衝突係数の大きい周辺衝突イベントが取り除かれていくことが分かる。また、ここで重要なのが中心衝突イベントを可能な限り減らされない様にしなければならないことである。

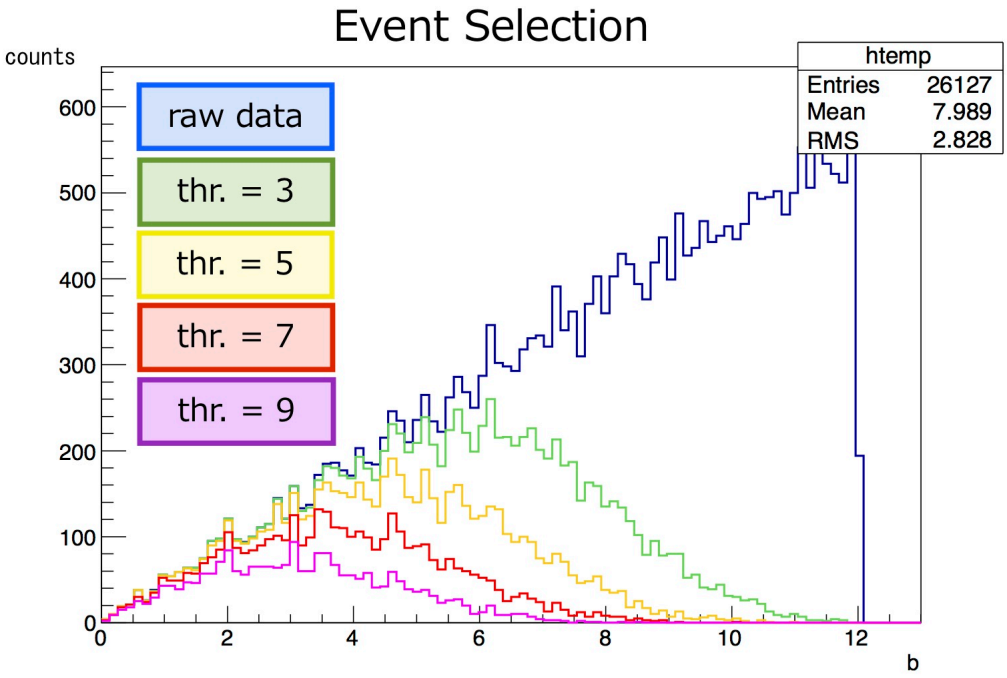


図 3.2　トリガーアレイによる重イオン衝突イベントの選別の様子。

多重度トリガーによるイベント選別の効果を見積もるため、トリガーが発行されるイベントのうち、中心衝突イベント数と周辺衝突イベント数の比を考える。中心衝突を選定するための目安が衝突係数 b=3.5fm とされている。そのため、当検証において b ≦ 3.5fm のイベントを中心衝突、b > 3.5fm のイベントを周辺衝突と定義する。また、トリガーの発行レートを (number of trigger)/(raw data) で定義する。得られたそれぞれの閾値でのイベント比 (中心衝突イベント数)/(周辺衝突イベント数)、トリガー発行レート、選別された中心衝突イベント数を表 3.1 に示す。

表 3.1　UrQMD + GEANT4 シミュレーションにより得られた多重度トリガーによるイベント選別の様子

| multi. threshold | イベント比 | トリガー発行レート | 中心衝突イベント数 |
|---|---|---|---|
| 0(raw data) | 0.092 | 1 | 2210 |
| 1 | 0.141 | 0.680 | 2210 |
| 2 | 0.194 | 0.519 | 2205 |
| 3 | 0.264 | 0.402 | 2195 |
| 4 | 0.355 | 0.316 | 2167 |
| 5 | 0.475 | 0.250 | 2110 |
| 6 | 0.629 | 0.196 | 1983 |
| 7 | 0.843 | 0.151 | 1810 |
| 8 | 1.145 | 0.114 | 1603 |
| 9 | 1.479 | 0.085 | 1340 |
| 10 | 1.894 | 0.062 | 1063 |

これを見ると、イベント比は multi. threshold に対して常に増加しているので、multi. threshold を上げるほど SπRIT-TPC が DAQ できるデータのうち、中心衝突イベントの割合は増えることになる。その一方で、全体のイベント数、中心衝突イベント数は単純に減少しているので、実際にどの程度の頻度で衝突現象が発生するかによって、ビームタイム中の DAQ 効率が悪くなりうることも示している。したがって、実際の実験により近いシミュレーションをするためには、MPPC 検出効率やビームレート、多重度ロジックの dead time 等も考慮して、最適な多重度の閾値を探す必要がある。

# 4　HIMAC テスト実験

多重度トリガーアレイの押し出し型シンチレータが重イオン衝突から生じる荷電粒子に対してどのような応答 (得られる光量など) を示すのかを調べるために、2014 年 11 月 11 日 - 11 月 14 日に HIMAC でのテスト実験を行った。この章では、実験施設 HIMAC に関して述べた後、テスト実験の概要、得られた結果と生じた問題点について述べる。

## 4.1　HIMAC

本実験は放射線総合医学研究所の重粒子線がん治療装置 (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba : HIMAC) を用いて行った。図 4.1 に HIMAC の全体図を示す。HIMAC は PIG イオン源、ECR イオン源の二つのイオン源を有しており、PIG 型は軽めの粒子 (炭素、窒素、ネオンなど) を、ECR 型は重粒子のイオン生成に適している。これらのうち、どちらか一方のイオン源から放出されるイオンをビームとして引き出し、最初に RFQ ライナック、アルバレライナックと呼ばれる二台の線形加速器により約 6MeV/A まで加速させる。その後、主加速器であるシンクロトロン (リング直径約 42m、周長約 130m) により実験または治療に必要なエネルギーまで加速させ、実験室や治療室へ送り出す。今回の実験では $^{132}$Xe を 300MeV/A まで加速させて CsI ターゲットへ衝突させて実験を行った。$^{132}$Xe を用いた理由は、スズと原子番号や質量数が近いために、より SπRIT 実験の衝突系に近い環境を再現できると考えたためである。

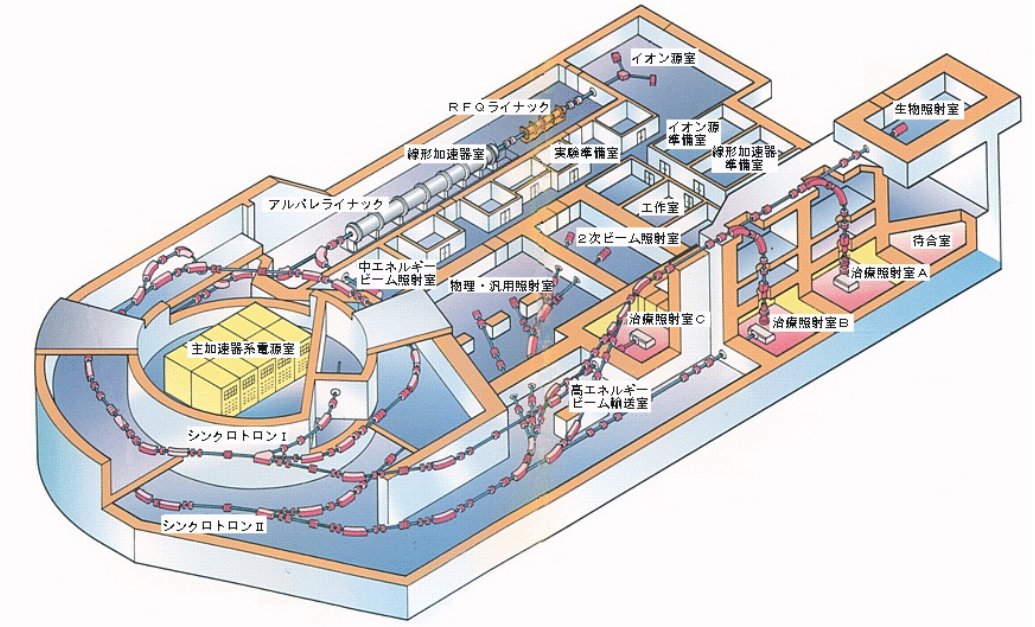


図 4.1　HIMAC の全体図。

今回実験を行ったのは、物理・汎用照射室の PH2 というビームラインである。図 4.2 にその概略図を示す。

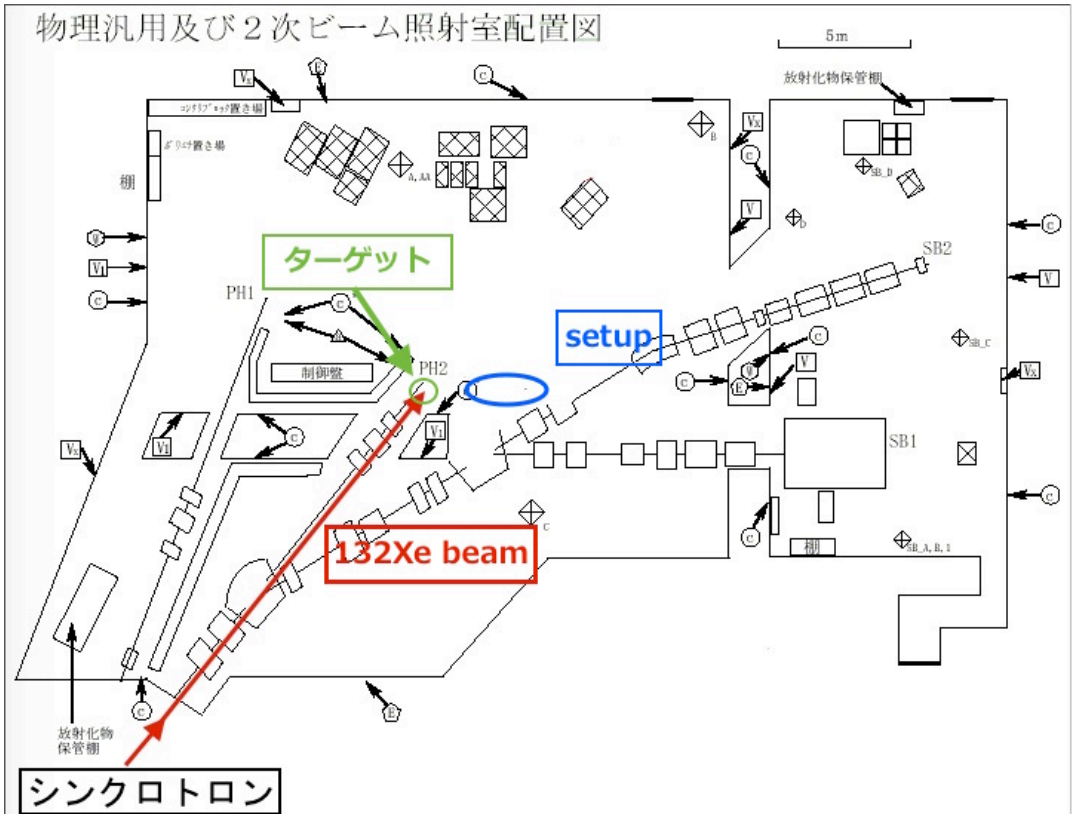


図 4.2　物理・汎用照射室の概略図。

## 4.2　HIMAC テスト実験の目的

押し出し型シンチレータに粒子が入射したときに生じるシンチレーション光を WLSF によって伝送、MPPC を用いて光検出するという粒子検出法は上述したように T2K グループのニュートリノモニターとして行われているが、SπRIT 実験のように重イオン衝突から生じる数十 MeV 陽子などの軽粒子に対する応答は調べられてはいない。そのため、HIMAC において SπRIT 実験と類似した重イオン衝突系を用いて基本的な性能評価を行い、多重度トリガーアレイを構築するための知見を得ることがテスト実験の目標である。具体的な評価事項としては、以下の通りである。

- SπRIT 実験において想定される陽子などの軽粒子が、押し出し型シンチレータへ入射したときに得られるシンチレーション光が WLSF によって MPPC にまで伝送された時点で、MPPC ノイズに紛れない程度の光量が得られることを確認する
- シンチレータ間のクロストークの有無を調べる

- シンチレータ及び WLSF において、シンチレーション光が伝播する時間を調べる
- 多重度トリガーロジックが正常に動作することを確かめる
- 多重度トリガーロジックの遅延時間を測定する

以上が想定していたテスト実験の目的であるが、実験時に発覚した問題により、実際に実施できたのは光量に関わる項目のみであった。この点については後に述べる。

## 4.3 測定のセットアップ

### 4.3.1 光量の測定

実機に用いる押し出し型シンチレータの性能評価は前述の通り T2K グループによって行われてきたが、MPPC から 50cm の位置に電子 3GeV ビームを照射したときに、特別に加工をしていないシンチレータから得られる光量はおよそ 16p.e. 程度であり、陽子などの軽粒子 (原子核) に対する応答は調べられていない。一般的にシンチレータ内で荷電粒子が落とすエネルギーは Bethe-Bloch Formula によって計算され、dE/dx は電子よりも陽子などの荷電粒子の方が大きいため、得られる光量はより大きくなることが予想される。図 4.3 に MPPC にて得られる光量を測定するためのセットアップの概念図を示す。試験機として、SπRIT 実験において用いる予定の押し出し型シンチレータ (45cm × 5cm × 1cm)、WLSF(Y-11(200)MS)、MPPC、読み出し及びトリガー信号生成に VME EASIROC を使用する。これらの基本的な性能は前述の通りである。試験機の配置は、重イオン衝突により生じる陽子などを利用するために、高さはビームラインとシンチレータの中心軸が一致するように、角度はターゲットから見てシンチレータをビームラインに対して 60° の位置に設置した。多重度ロジックが稼働することを確認するために、シンチレータは 45cm × 5cm の面が接するように 6 枚を直に重ねた形でブラックシートで遮光した。また、DAQ トリガーをかけるために、シンチレータのスタック上流、下流の両方にトリガーカウンターとしてプラスチックシンチレータ + PMT を設置し、二本のトリガーカウンタからの信号及び、図 4.3 中の上流より 3 番目の MPPC による VME EASIROC Discriminator 出力を合わせた三つの信号のコインシデンスを VME EASIROC の HOLD 信号として用いた。また、HOLD 信号と VME EASIROC の多重度トリガー信号出力を SCALER へ入力させた。ここで、シンチレータ、WLSF、MPPC の各組は実験の間に変更することはしないようにし、シンチレータから MPPC までの一つのセットを本論文では MPPC A(, B, C, D, E, F) 等と呼ぶことにする。光量測定の際は、ターゲット側から A, B, C, D, E, F と設置した。

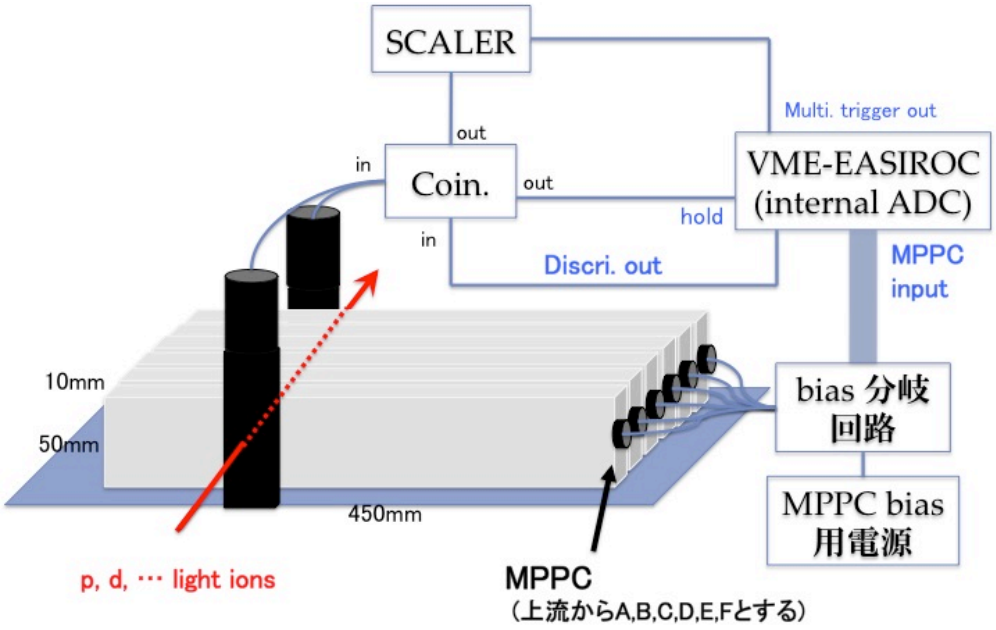


図 4.3　試験機のセットアップ概要。

### MPPC と WLSF のコネクション

実機で使用するものと同じ WLSF を用いた。MPPC とのコネクションは GOMI コネクタによって行い、コネクタ側のファイバー端面はファイバーフィンを用いて研磨することで、端面における光の散逸が小さくなるようにした。ファイバーとコネクタの固定は行わなかった。

### MPPC バイアス電源

MPPC バイアス電源とし松定プレシジョン社製 Matsusada PL-120-0.6 120V 直流電源 (以下、松定電源と呼ぶ) を用いた。この機種は 60V 以上の電圧を印可させる場合、表面のモニターでは 1V の精度でしか出力電圧を確認できないが、リモートコントロールコネクタとして背面の J2 バスを有しており、印可電圧のモニターとして 0-120V 出力を 0-10.00V に直して出力させているピンがある。つまり、背面モニター出力の値に 12 をかけることで、0.12V 刻みで出力電圧を調節することが可能である。テスト実験においてはモニター出力 5.90V、つまり出力電圧は 70.8V(±0.12V) に設定して実験を行った。

図 4.4　松定電源フロントパネル

図 4.5　背面の J2 バスコネクタ

## 電源分岐用回路基板

松定電源を複数の MPPC に同時に印可するために簡単な分岐回路基板を作成した。図 4.6 に分岐回路の概念図を、図 4.7 に実際に作成した基板の写真を示す。松定電源から印可される電圧を並列につないだ 10kΩ 抵抗によって分割し、一方の電極をグランドに落とした 0.1$\mu$F コンデンサによって電圧値を保持、MPPC へ保持された電圧を印可する、という仕組みである。MPPC の信号ピンは VME EASIROC の MPPC 入力へと送られる。MPPC 側は 20pin フラットケーブル、VME EASIROC 側とは二本の 34pin プラットケーブルで接続され、SπRIT 実験におけるランダムな荷電粒子の入射をできるだけ再現するため、VME EASIROC 側の MPPC 入力チャネルは ch2, 7, 10, 13, 16, 21, 26, 31 の 8 チャネルを接続させた。

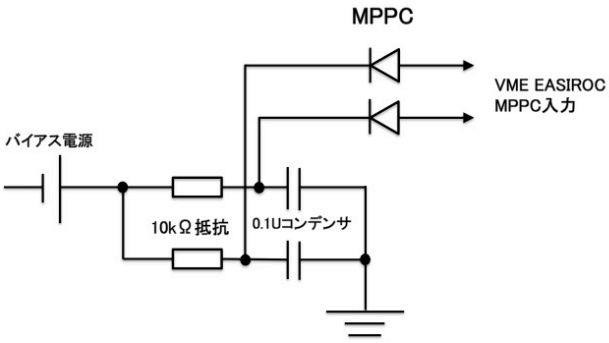


図 4.6　分岐回路概念図。実際はこれを 8 チャネルに分岐させ、うち 6 チャネルを MPPC と接続させて使用した。

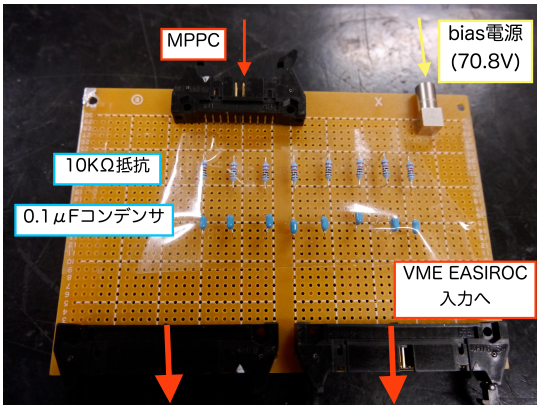


図 4.7　電源分岐回路写真。

**実際の位置関係**

図 4.8 に、下流側から見た試験機のセットアップ写真を示す。ターゲットチェンバーが暗幕で覆われているが、ターゲットと二本のトリガーカウンタは直線を形成するように配置されており、この直線に対してシンチレータのスタックを垂直に移動させ、粒子の通過する位置を変えながら測定を行う。実際には、MPPC 側のシンチレータ端面から 7.5cm、12.5cm、22.5cm、32.5cm、37.5cm の各点と上述の直線が交わるように配置して測定を行い、MPPC で得られる光量がどの程度になるかを調べた。今回は押し出し型シンチレータから得られる光量の位置依存性やファイバーの減衰長などを調べることはしないため、トリガーカウンターは荷電粒子を通過する位置を絞ることよりも、統計量を高めるためにある程度の (押し出し型シンチレータ方向に) 幅を許して用いることにした。具体的にはシンチレータのスタックの前後に設置したトリガーカウンターの幅は 5cm である。

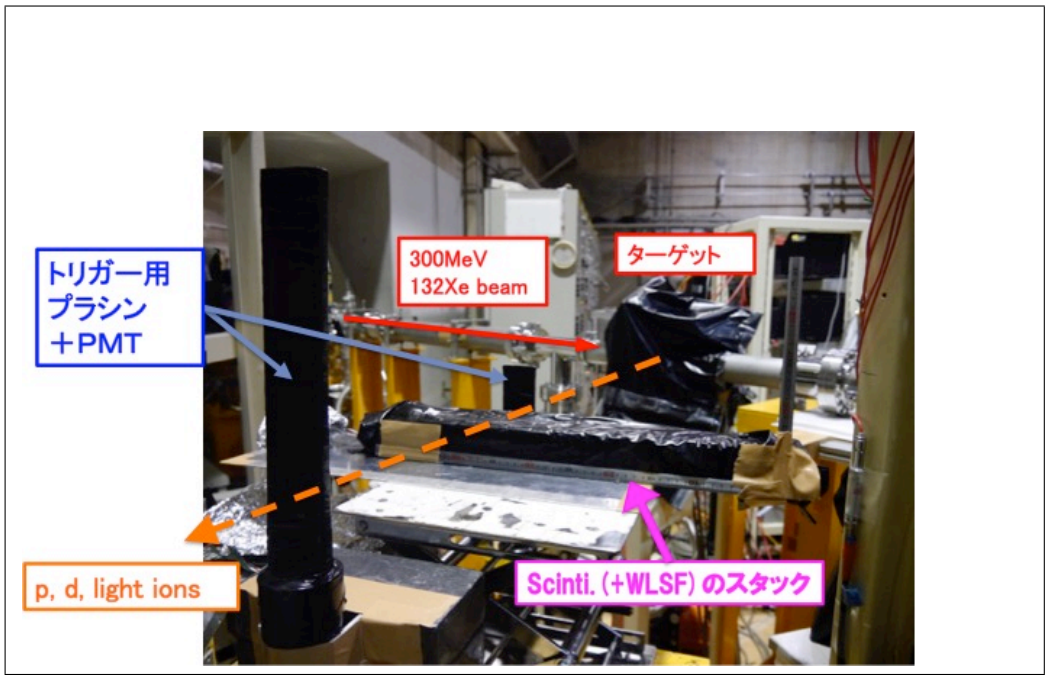


図 4.8　試験機のセットアップの写真 (光量測定)。

### 4.3.2　光量の定義

本測定においては光量を以下のように定義する。

$$\text{光量}\ (p.e.) = \frac{\text{ピークの}\ ADC\ \text{値} - \text{ペデスタルの}\ ADC\ \text{値}}{\text{ゲイン}\ (1p.e.\text{分の}\ ADC\ \text{値})} \tag{4.1}$$

MPPC のゲインは、LED(緑色発光波長) を使用して 0p.e.、1p.e.、2p.e. ピークをガウシアンフィッティングにより得、それぞれ ADC 値を p.e. 数にキャリブレーションした。典型的な LED 光による MPPC-VME EASIROC のヒストグラムを図 4.10 に示す。また、実験で得られたある MPPC のヒストグラムを図 4.11 に

示す。一般的に荷電粒子がシンチレータ内で落とすエネルギーはランダウ分布になるため、図 4.11 も光量の高い側にテールを引く形になっているが、今回は特に断らない限りは、分布のピークをガウシアンフィッティングすることにより得る ADC 値をピークの ADC 値と定義することにする。

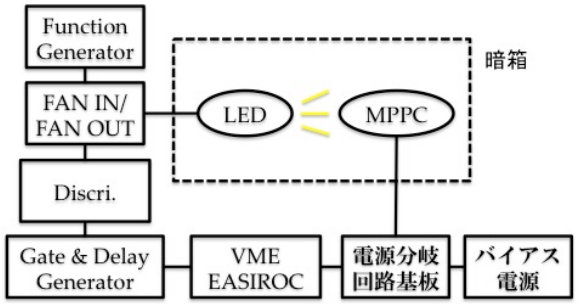


図 4.9　LED によるゲインチェックのセットアップ概観。

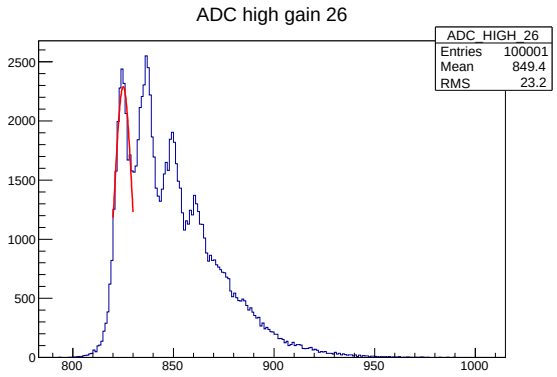


図 4.10　LED により得られたヒストグラム。

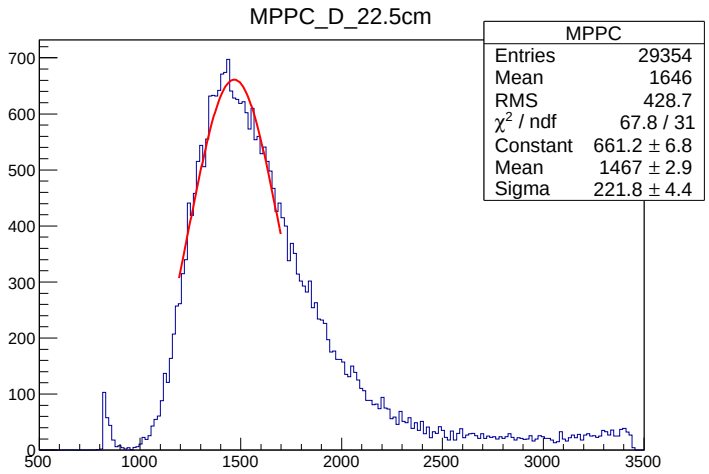


図 4.11　MPPC 側のシンチレータ端面から 22.5cm の位置に荷電粒子が入射したときに実際に得られた MPPC ヒストグラム。

### 4.3.3　測定した結果

表 4.2 にシンチレータの位置を変えながら、各 MPPC で得られた光量のグラフを示す。ここで MPPC A, B, D, E の四機のみの表示となっているのは、二つの MPPC において MPPC ピンにおける接続不良が生じ、データ取得が困難だったためであり、ビームタイム以前から少々不安定な動作を示していたものである。

表 4.1　得られた光量 (MPPC キャリブレーションのみ)

| 端面からの距離 | 7.5cm | 12.5cm | 22.5cm | 32.5cm | 37.5cm |
|---|---|---|---|---|---|
| MPPC A | no data | no data | 72.0±0.4 | 63.7±0.3 | 57.8±0.3 |
| MPPC B | 66.5±0.2 | 69.2±0.3 | 64.5±0.3 | 62.2±0.2 | 61.5±0.3 |
| MPPC D | 72.6±0.2 | 70.6±0.2 | 62.3±0.3 | 61.6±0.2 | 60.7±0.2 |
| MPPC E | 51.7±0.2 | 51.1±0.1 | 46.8±0.2 | 43.0±0.1 | 41.3±0.1 |

表 2.1 から、クロストーク&アフターパルスレートとして 0.11 を採用 (実験時 $V_{bias} - V_{bd} \leqq 1.0V$ であった) して光量の補正を行うと、以下のように補正される。

表 4.2　クロストーク&アフターパルスレート補正後の光量

| 端面からの距離 | 7.5cm | 12.5cm | 22.5cm | 32.5cm | 37.5cm |
|---|---|---|---|---|---|
| MPPC A | no data | no data | 64.1±0.4 | 56.7±0.3 | 51.4±0.3 |
| MPPC B | 59.2±0.2 | 61.6±0.3 | 57.4±0.3 | 55.4±0.2 | 54.7±0.3 |
| MPPC D | 64.6±0.2 | 62.8±0.2 | 55.4±0.3 | 54.8±0.2 | 54.0±0.2 |
| MPPC E | 46.0±0.2 | 45.5±0.1 | 41.7±0.2 | 38.3±0.1 | 36.8±0.1 |

これを見ると、MPPC E において光量が全体的に低くなっているが、ゲインキャリブレーション、未固定であった MPPC・WLSF の接続等、原因はいくらか考えられる。その他三つの MPPC においては、最も遠い測定点である 37.5cm でもおおよそ 50p.e. 程度を達成している。

### 4.3.4　シンチレータのクロストークの確認

実機に使用する押し出し型シンチレータには表面に酸化チタンの反射材コーティングがされているが、製造時の状態のままでは、120cm × 5cm の面を重ね合わせた際には 7% 程度のクロストークが起こることが T2K グループの性能評価により報告されている [15]。トリガーアレイ実機においては 45cm × 1cm の面が接触することになるが、シンチレータ間におけるクロストークは多重度を数え間違える原因になるため、正確な多重度トリガーの発行に重大な影響を及ぼす。

まず HIMAC において、45cm × 5cm の面が重なり合うように積み上げたシンチレータ間を遮光した場合としていない場合の比較をして、クロストークが起きていることを確認することとした。図 4.12 に実際の測定でのセットアップ概要を示す。MPPC の接続確認などを施したため、重ねる順番で変わってはいるが、基本的な配置や条件は光量測定のときのセットアップと変わらない。

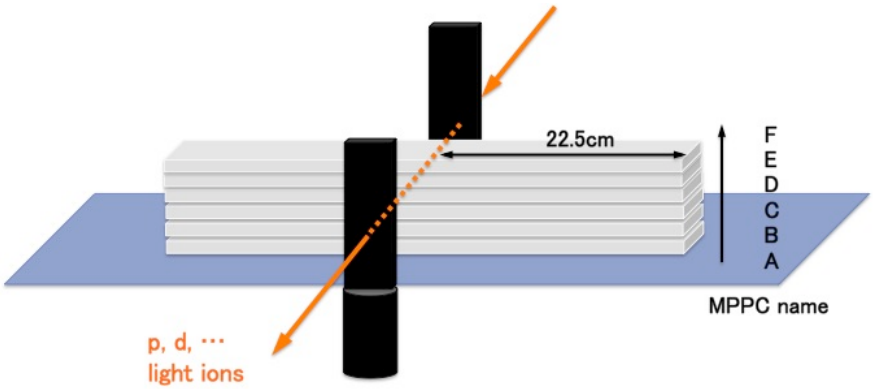


図 4.12　シンチレータクロストークチェックの概略図。

遮光をしていない場合の得られたヒストグラムを図 4.13 に示す。MPPC のナンバリングは光量測定のときと同じであり、今回は下から A, B, C, D, E, F となっている。また、DAQ トリガーの条件は前後のトリガーカウンタ二枚と MPPC D の Discriminator 出力のコインシデンス信号で取っている。そのため、考えられる DAQ の条件としては、$^{132}$Xe ビームとターゲットが起こす衝突事象から得られる軽い粒子が上から 3 番目のシンチレータ (MPPC C) に入射して発生するシンチレーション光を MPPC C が検出する or 3 番目以外のシンチレータに入射し、クロストークによって 3 番目のシンチレータに漏れ出てきた光子を MPPC C が検出する、という二つの場合が考えられる。

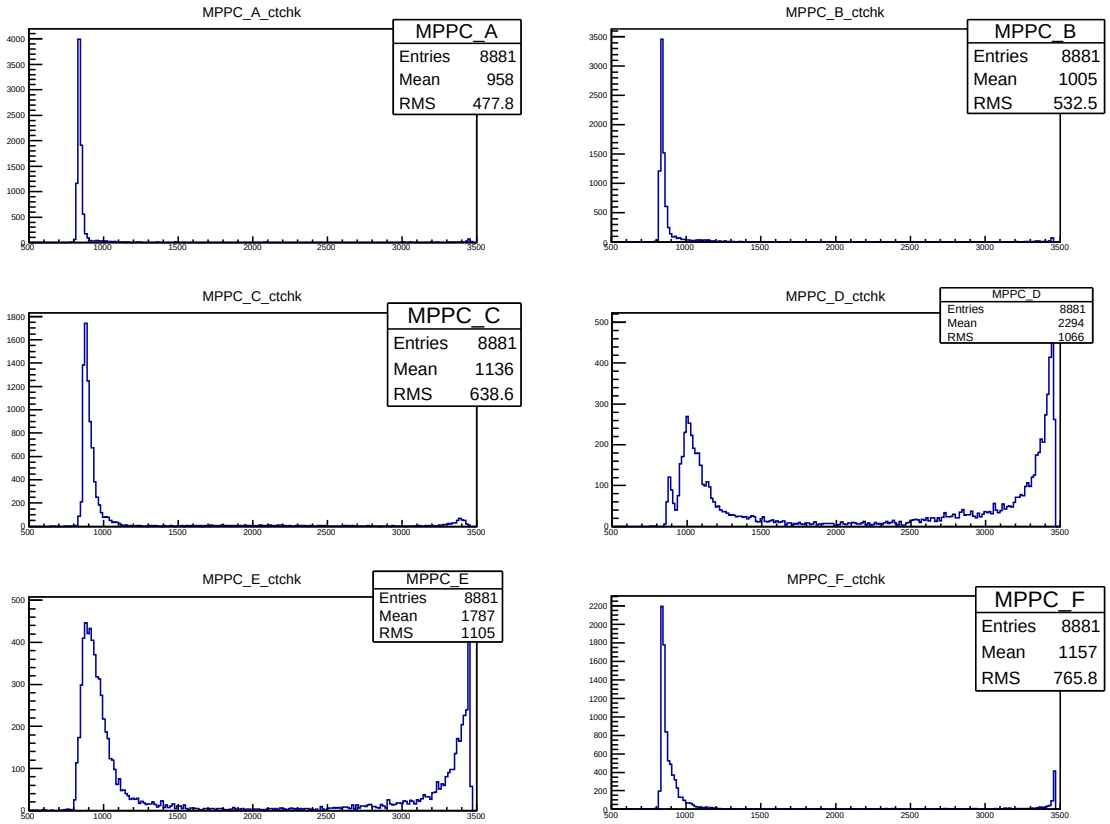


図 4.13　シンチレータクロストークチェックの際のヒストグラム (遮光なし)。

このヒストグラムを見ると、MPPC D と MPPC E が似た振る舞いを見せており、高エネルギー側で飽和してしまっている。これは荷電粒子がシンチレータ内を通過する距離が単純計算で約 5 倍となったために、シンチレータ内でのエネルギーロスが大きくなり、その結果として伝送される光量が多くなってしまったため、EASIROC で決められているダイナミックレンジ (約 160fC-320pC) を越えてしまったことが考えられる。また、DAQ トリガーに組み込んだ MPPC C を基準に他の MPPC から得られたヒストグラムとの相関を取ると、以下の図 4.14-4.18 のようになる。

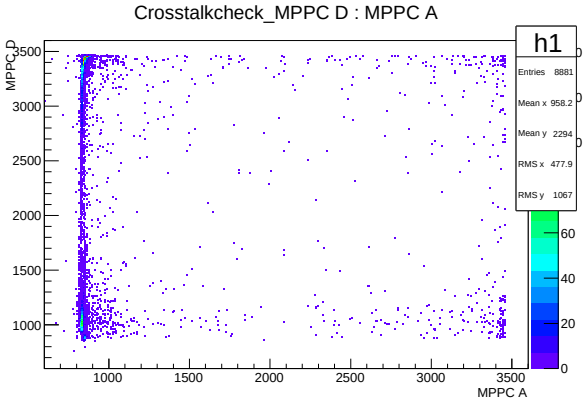


図 4.14　MPPC D と MPPC A の相関

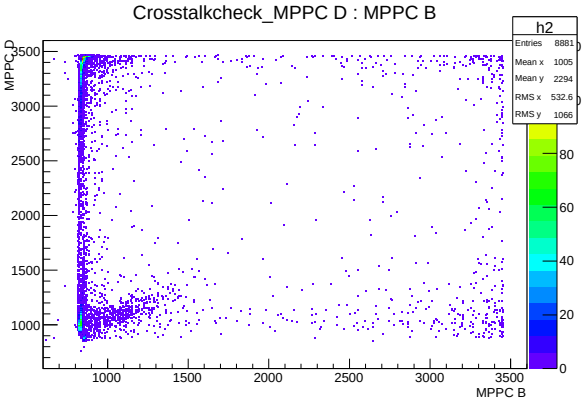


図 4.15　MPPC D と MPPC B の相関

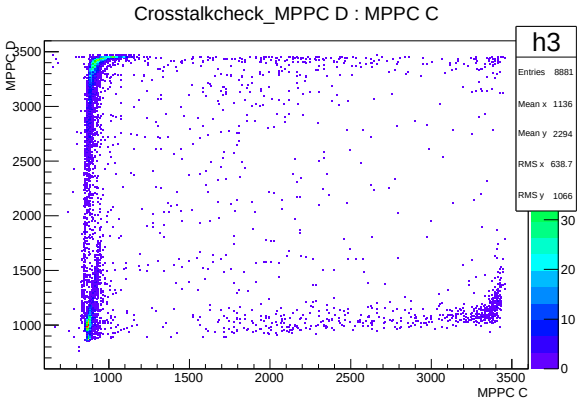


図 4.16　MPPC D と MPPC C の相関

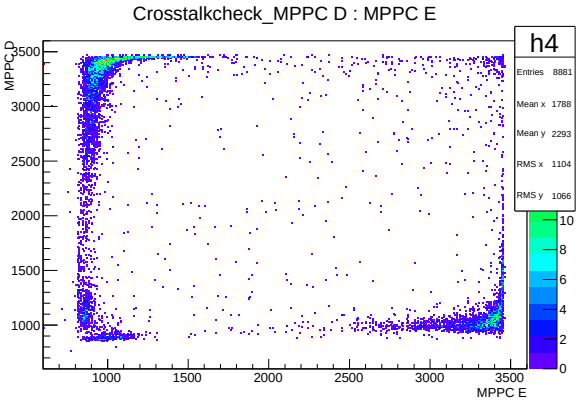


図 4.17　MPPC D と MPPC E の相関

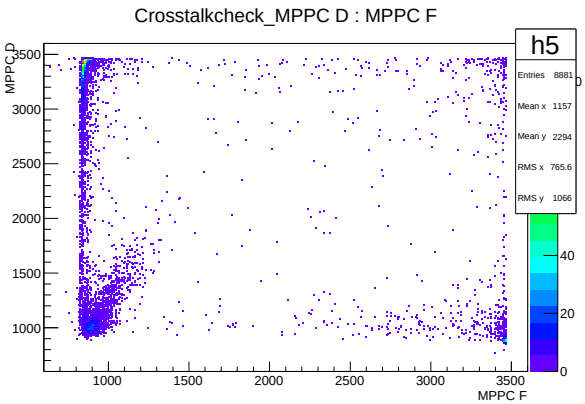


図 4.18　MPPC D と MPPC F の相関

ヒストグラムの相関を順次確認する。MPPC D と MPPC A の相関図 4.14(この章では D-A 等と呼ぶ。)では、特別な相関は見られない。D-B では、ADC チャンネルで 1500 以下の領域におよそ 1:1 の相関のようなものが見て取れる。両者が低エネルギー (光量の低い) の相関を取り得る可能性としては、MPPC C において荷電粒子が通過し、発生したシンチレーション光がクロストークすることにより MPPC D と MPPC B で観測される、というものである。これは D-F でもそれらしき振る舞いが見て取れ、MPPC E に荷電粒子が通過することで発生するシンチレーション光のクロストークであると考えられる。そして D-C でも、光量の低い側においてかすかに相関が見られるが、MPPC C が荷電粒子が通過したであろう光量の大きいイベントを取れておらず、ほとんどがペデスタル近傍のイベントになっていることから、何らかの原因で動作不良を起こしているものと考えられる。最後に D-E であるが、ヒストグラムでは MPPC E でも光量の大きいイベントが入っているが、D、E の両方が光量が大きいイベントを取っているという相関は見られず、ほとんどがどちらか一方に荷電粒子が入射し、クロストークで相手側に少量の光が漏れるというイベントになっていると考えられる。

以上のように、既に報告されていたクロストークの問題が確認された。次に、アルミホイルを使って遮光をした場合のヒストグラムを同様に、図 4.19 に示す。ただし注意として、遮光の前後でスタックの順番が変わってしまい、下から A, F, D, B, C, E となっている。DAQ トリガーに参加させた EASIROC Discriminator 出力は変わらず、MPPC D である。

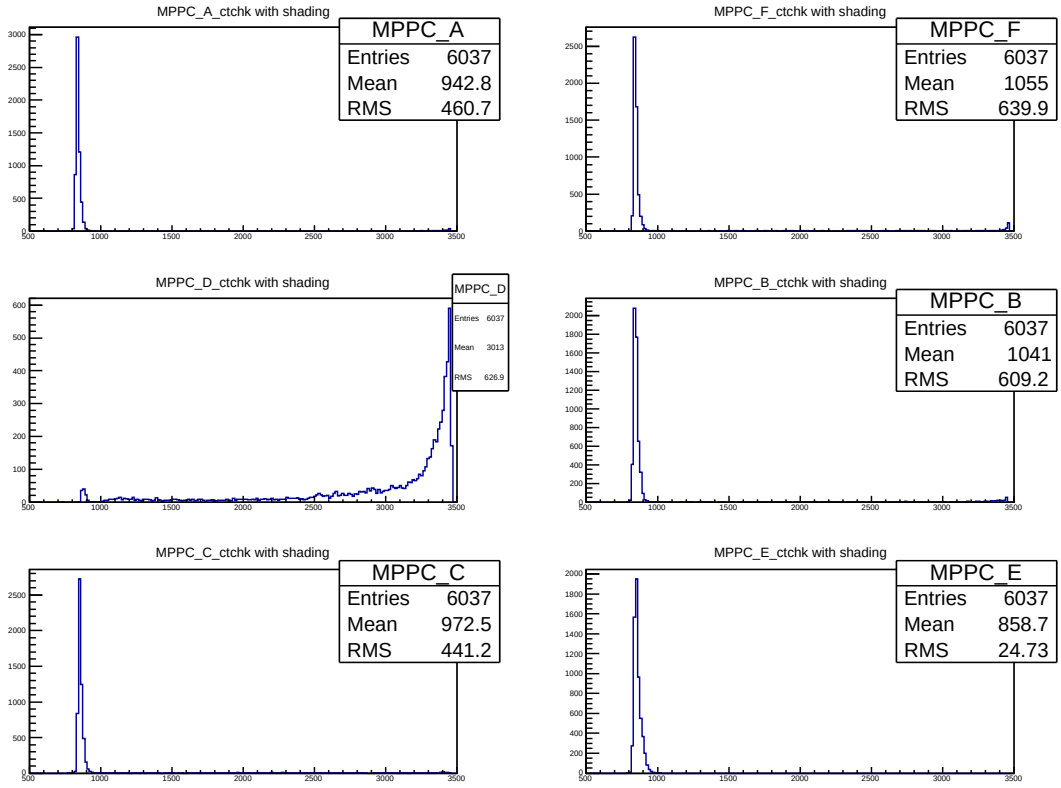


図 4.19　シンチレータクロストークチェックの際のヒストグラム (遮光あり)。

これを見ると、MPPC D からのクロストークや隣り合うシンチレータでのシンチレーション光がクロストークして DAQ される、というようなイベントが確認されなくなったことが分かる。また、遮光前の MPPC D ヒストグラムで見られていた ADC ch 1000-1100 付近のイベントがなくなっており、遮光前の MPPC D のヒストグラムで見られていた光量の低いイベントが荷電粒子の通過による現象でなく、クロストークにより漏れてきた光を検出していたものと考えられる。

ここで、ヒストグラムや相関図を見て確認されることであるが、イベントとしてはっきりと荷電粒子の通過による発光を捉えているもの、クロストークによるイベントを捉えているものでないようなイベントが存在している。具体的には、相関図全体にうっすらとプロットが散在しているといった点である。これは、ターゲットから飛来する荷電粒子がシンチレータの一部分を触れるように通過してしまい、完全に通過するような場合に比べて落とすエネルギーが低いという場合や、DAQ トリガーに参加させた MPPC D が Discriminator を越えるだけの光量を得たイベントにおいて、他のシンチレータにも同時に別の粒子が入っているという場合、宇宙線によるイベントなどが考えられるが、現状のデータから特徴を見出すことは容易ではなく、原因の明確な解明には至っていない。

## 4.4 生じた問題点と原因の検証

ビームタイム中、slow control によって指定する multi. threshold に対して、多重度トリガーが正常に出力されていないことがあった。具体的には、SCALER の多重度トリガー信号を入力したチャネルをチェックしていると、使用しているシンチレータ・MPPC の数である 6 より閾値を高く上げても、トリガーが発行されてしまっていることが判明した。これは、何らかの原因でクロストークが起きてしまい、多重度の検出をミスしていることを示唆している。また、閾値を 9 以上にするとトリガー信号は全くカウントされなくなった。

### 4.4.1 バイアス電源分岐基板のクロストーク

閾値を 9 以上にするとトリガー信号のカウントがなくなったことから、VME EASIROC の MPPC 入力のうち 8 チャネルが原因不明の入力を受け付けているという現象である。また、トリガー信号が発行されるタイミングがシンクロトロンによるビームバンチの周波数と一致していたことから、恒常的なノイズによるトリガーの発行ミス等ではなく、荷電粒子が試験機に飛来するタイミングに何らかのクロストークが起きて、多重度が実際よりも多く捉えてしまっているものと考えられた。そこで、ビーム中のデータから EASIROC が信号を受け取っているチャネルを確認するために、VME EASIROC によって DAQ したデータのうち、High Gain 側の全 ADC ヒストグラムを図 4.20 - 図 4.23 に示す。

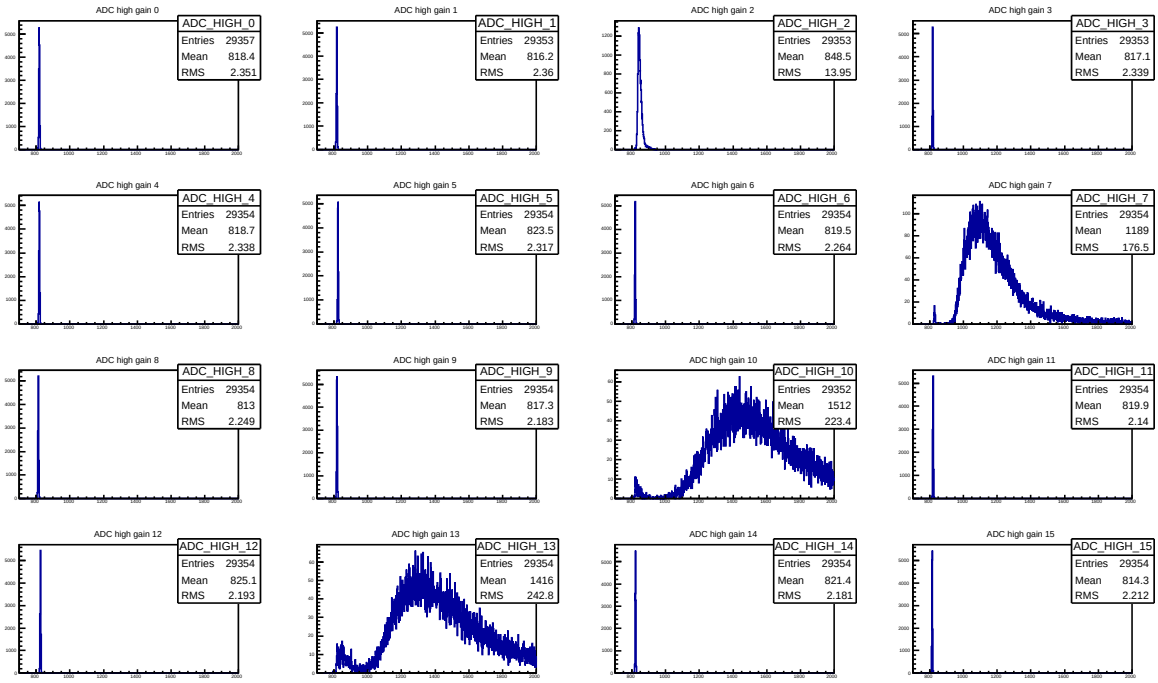


図 4.20　シンチレータ端面から 22.5cm の位置に粒子を通過させて光量を測定した際における、EASIROC の ADC ヒストグラムの一覧 (ch0-ch15)。

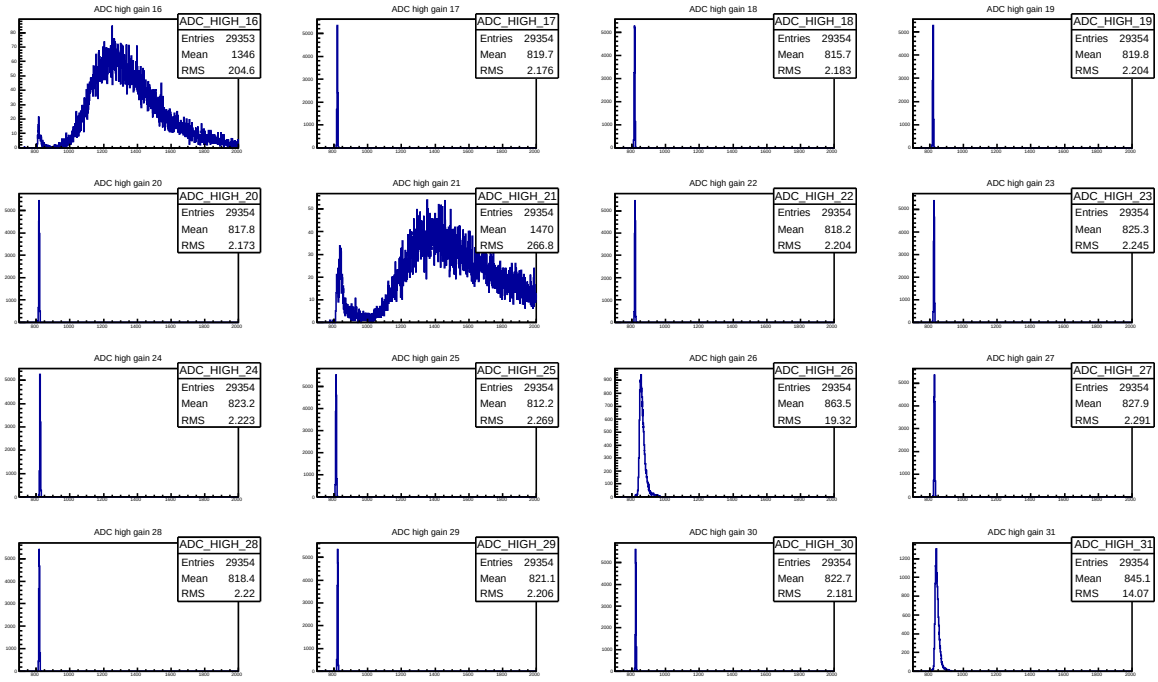


図 4.21　ADC ヒストグラム一覧：ch16-ch31

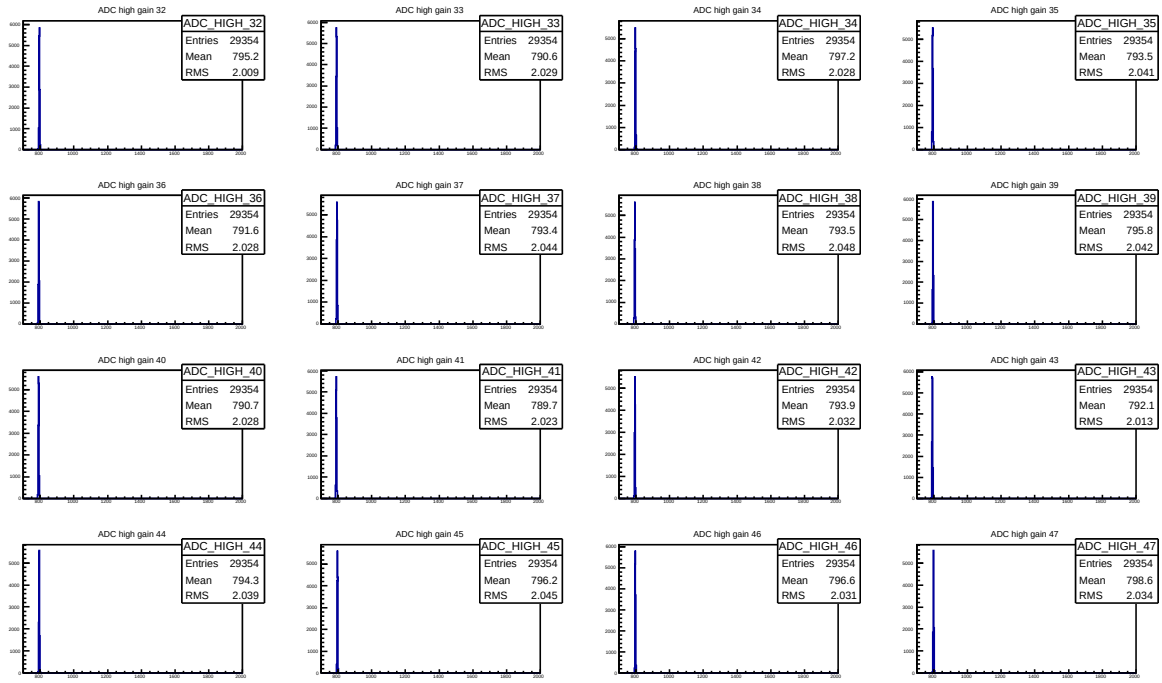


図 4.22　ADC ヒストグラム一覧：ch32-ch47

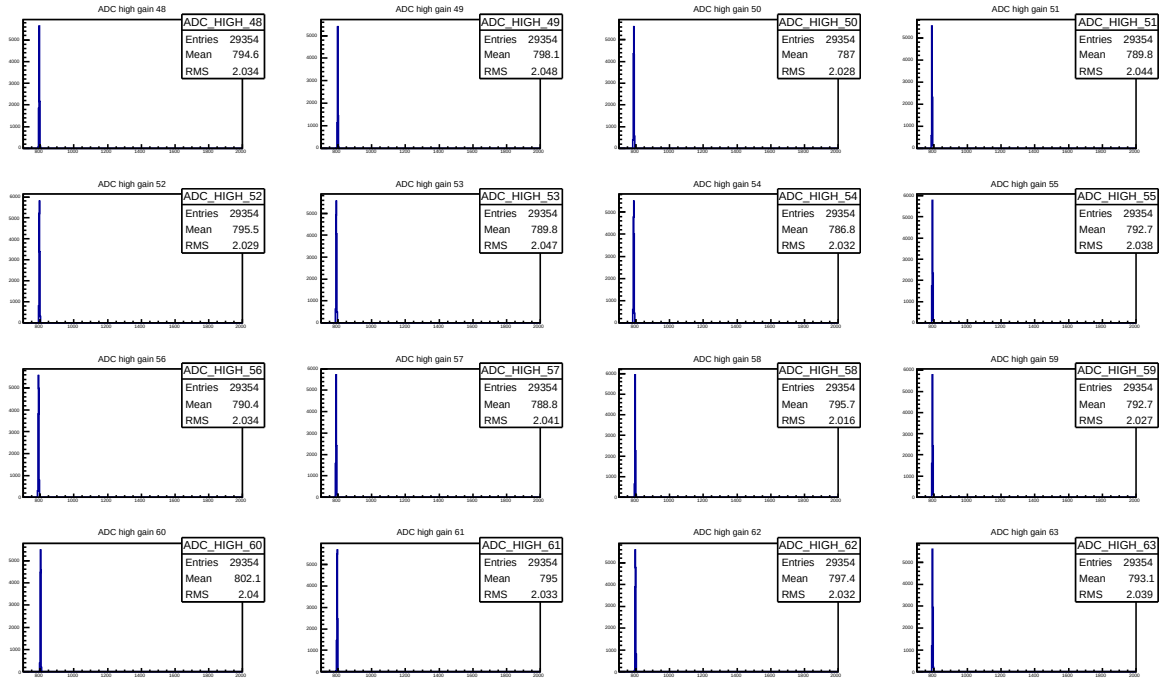


図 4.23　ADC ヒストグラム一覧：ch48-ch63

ここで、テスト実験においては ch32-ch63 はケーブルをつないでおらず、ADC チャネルで RMS が 2 程度のペデスタルデータのみとなっており、これは EASIROC の公称値と大きく変わらない。MPPC の信号が入力されているものは ch7, 10, 13, 16, 21 であり、MPPC が光検出したヒストグラムであることが確認できる。ch26 は MPPC が繋がっているが信号が見えていないため、接触不良と考えられる。ch2, ch31 のチャネルは電源分岐回路基板上で回路素子の繋がったチャネルであるが MPPC は接続されていないために、本来信号の入力はあるはずのないチャネルであるが、RMS の幅がペデスタルよりも広がっており、何らかの小さな信号がビームの照射されるタイミングと同時に入っていることが分かる。

さらに、MPPC 一つのみを電源分岐基板に接続して LED で動作確認をしたところ、同様に残りの 8 つのチャネルでクロストークによるものと思われるペデスタルの RMS 幅が広がる現象が確認された。以下に基板を接続した EASIROC 一枚の ADC ヒストグラム一覧を示す。

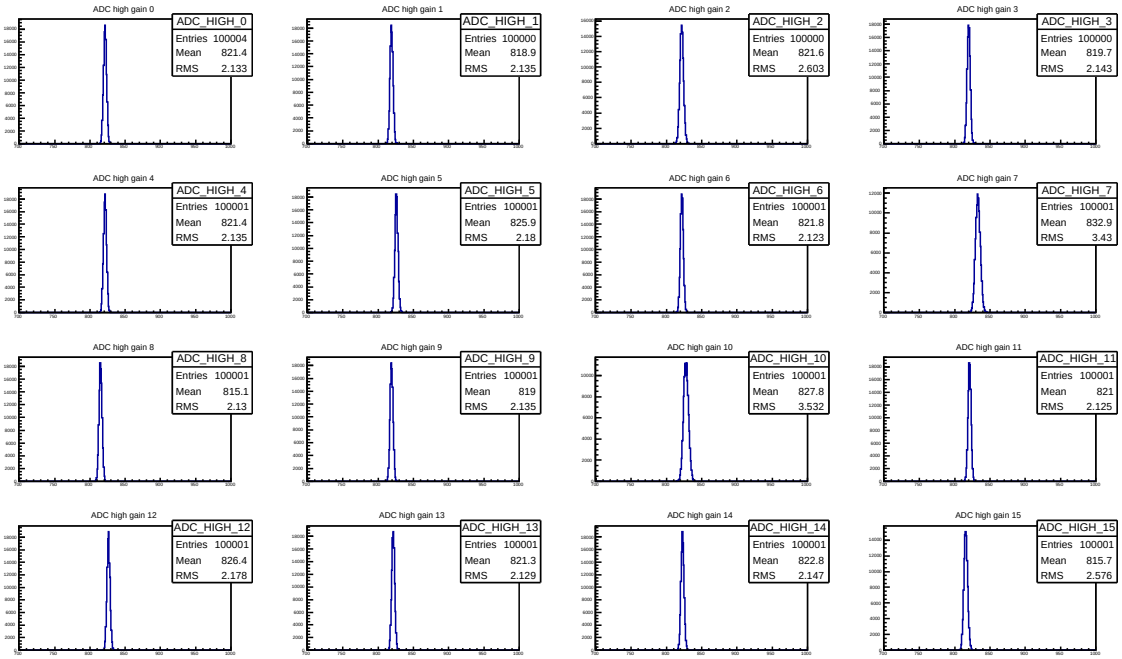


図 4.24　LED を用いて MPPC にパルス光を照射したときにおける EASIROC の ADC ヒストグラムの一覧 (ch0-ch15)。

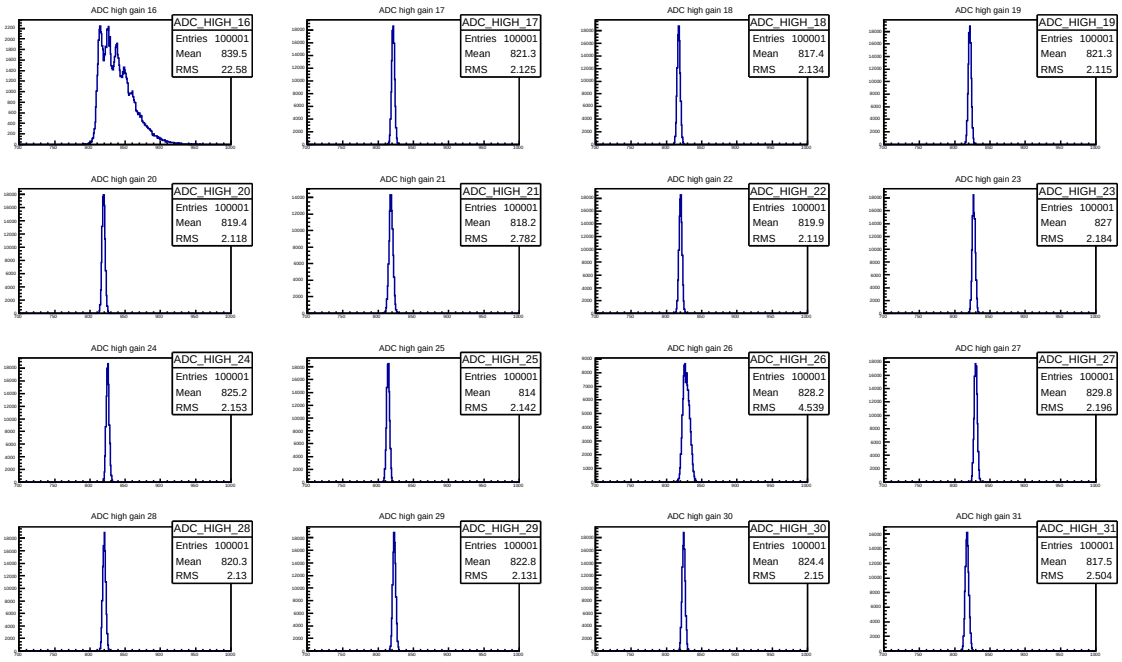


図 4.25　ADC ヒストグラム一覧：ch16-ch31

ch16 が MPPC を接続しているチャネルであり、分岐基板と接続されているチャネルは 2, 7, 10, 15, 21,

26, 31 である (テスト実験時とは結線が異なり、ch13 → ch15 となっている)。EASIROC 一枚 32 チャネル分のヒストグラムを見ても、これらのチャネルは他のペデスタルと比較して RMS の幅が大きくなっていることが分かる。また、基板上での信号線の配置を図 4.26 に示す。MPPC の接続した ch16 と隣り合っている信号線である、ch10、ch26 は RMS がペデスタルの二倍ほどに広がっていて、クロストークによる非ペデスタル信号を検出しているものと思われる。しかし、ch16 から見て最も遠くに位置する ch7 の RMS も同じ程度の広がりを持っており、隣り合った信号線を伝播するようにクロストークが起こっていると単純に理解することはできない。

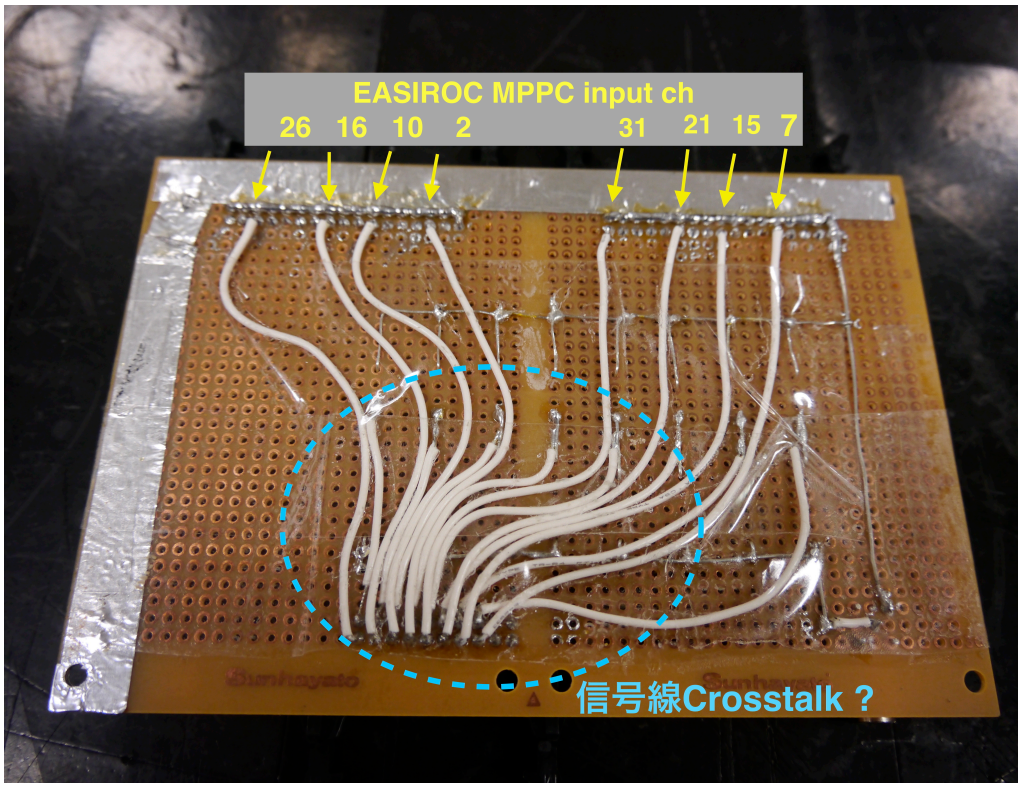


図 4.26　分岐基板の裏面

## 4.5　考察

HIMAC でのテスト実験で得られた知見に関してまとめる。

- 光量測定
  300MeV の $^{132}$Xe ビームを用いた重イオン衝突からの荷電粒子を測定した結果、MPPC から約 37.5cm 離れた位置に入射しても 50p.e. 以上の光量が得られることを確認した。この際のシンチレータ間クロストークに関しては定量的な評価はできていないが、先行研究の 7% のクロストークが起こるという点を考慮しても 50p.e. 前後の光量を得ることが可能であることが判明した。これはポアソン分布を仮定すると EASIROC 閾値を 5p.e. 程度に設定しても 99.9% 以上の検出効率を達成することを示している。

- シンチレータ間クロストーク
  荷電粒子がシンチレータのどれか一本だけに入るように、スタックを配置し、遮光の有無で面 (45cm × 5cm) が接触しているシンチレータの光量がどのようになるかを調べた。その結果、クロストークの発生を確定したが、EASIROC 側での飽和現象や荷電粒子の通過した位置を正確に求めることが難しいために、残念ながら定量的な評価とはなっていない。しかしながら、実機製作においてクロストークを考慮すべきは 45cm × 1cm の面であるため、加えての性能評価が必要である。これは後に述べることにする。

- 多重度の検出ミス、電源分岐基板上のクロストーク
  テスト実験中、多重度トリガー信号が設定する閾値に関わらず発行されているという現象が発生したために、VME EASIROC に実装した多重度ロジックのテストには至らなかった。原因追及のため、取得したデータを確認してみたところ、自主製作した MPPC バイアス電源分岐用の基板に由来するクロストークが原因と思われることが判明した。また、テスト実験中のデータは 6 個の MPPC を基盤につないでいたためにその性格が不明瞭であったため、一つの MPPC のみを接続したデータも同様に確認してみたところ、やはり基板上で結線したチャネルにクロストークが確認された。
  実機においては総計 60 チャネル分、電源を分岐させる必要があるため、電源分岐方法に関しても信号線クロストーク問題を考慮した上で再考する必要がある。

# 5　宇宙線と線源による評価

この章では、宇宙線や線源を用いて行ったシンチレータや WLSF の性能評価について述べる。

## 5.1　シンチレータ間クロストーク

ここでは、HIMAC でのビームタイム中に検証しきれなかった、1cm × 45cm 面同士のシンチレータ間クロストークがあるかどうかを宇宙線を用いて調べた結果を述べる。実機においてはこの面どうしが接触するため、ここにおいてクロストークがあることは多重度検出において重大な欠陥となる。図 5.1 に本測定の概略図を示す。幅 5cm のトリガーカウンタを片側一本の押し出し型シンチレータの真上、真下に配置し、二本のトリガーカウンタ及び、その間に挟まれるシンチレータ-MPPC-EASIROC の Discriminator 出力のコインシデンスを DAQ トリガー (HOLD 信号) とした。MPPC バイアス電圧など測定の条件は HIMAC 実験のときと同様である。ここで、宇宙線でトリガーをかける方のシンチレータを A、隣り合うものを B とする。

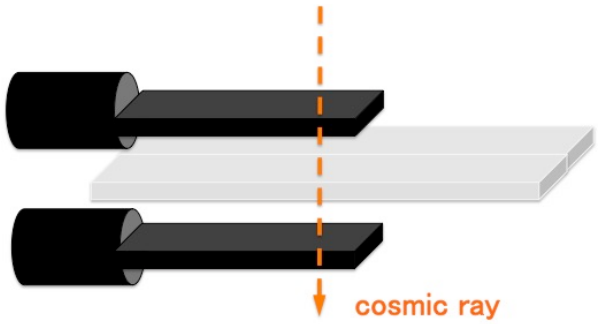


図 5.1　クロストーク測定セットアップの概要。

図 5.2　1cm × 45cm の面が接触するように固定したシンチレータ。

図 5.3　片方にアルミを巻いて遮光したもの。

これにより得られた各 MPPC のヒストグラム及び得られた光量を、それぞれ遮光の有無毎に表 5.1 に示す。

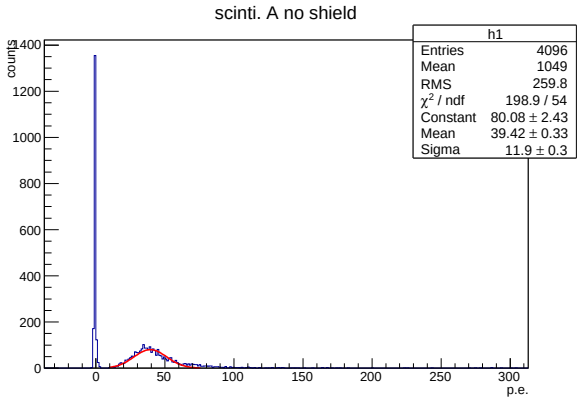


図 5.4　遮光なしの場合のシンチレータ A

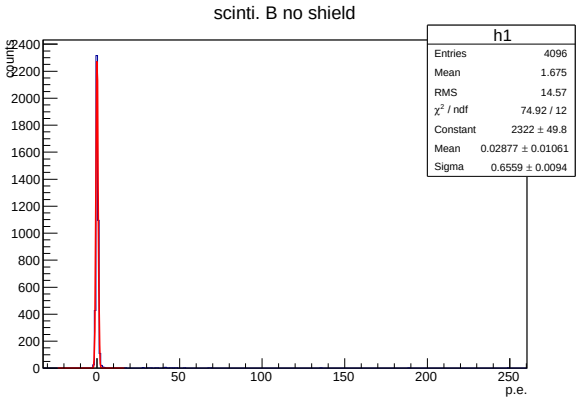


図 5.5　遮光なしの場合のシンチレータ B

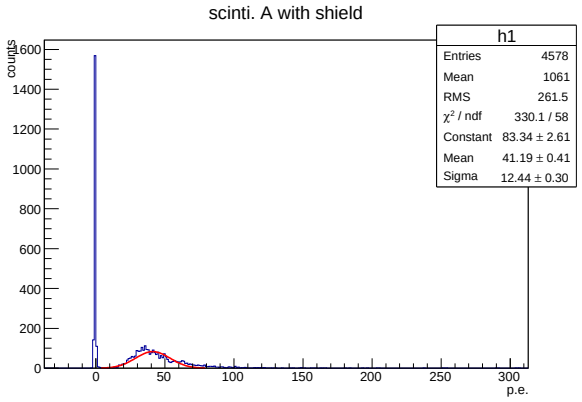


図 5.6　遮光ありの場合のシンチレータ A

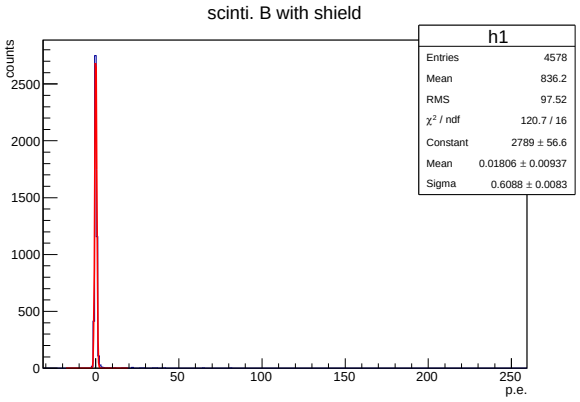


図 5.7　遮光ありの場合のシンチレータ B

表 5.1　宇宙線によるクロストーク測定 (MPPC クロストーク&アフターパルス補正済み)

| | 遮光なし光量 (p.e.) | 遮光あり (p.e.) |
|---|---|---|
| シンチレータ A | 35.1±0.3 | 36.7±0.4 |
| シンチレータ B | 0.03±0.01 | 0.02±0.01 |

以上の宇宙線により得られた結果では、隣り合うシンチレータのデータはほとんどペデスタルとなっていて、押し出し型シンチレータの 1cm × 45cm 面どうしにおけるクロストークは確認できるほどには生じていないと考えられる。これは前述の通り、1cm × 45cm 面に施されている反射材コーティングが 5cm × 45cm 面に施されているコーティングよりも厚くなっているからであると考えられる。しかし、宇宙線はそのほとんどがミューオンであり、重イオン衝突から生じる粒子は陽子ないし、陽子よりも重い粒子であるので、実際の

実験においては本測定より大量のシンチレーション光が発生するような場合も考えられる。それ故、例えばHIMAC テスト実験にて得られた 50p.e. 程度の光量でもシンチレータ間でクロストークが発生するかどうかは確認しなければならない。これは今後の課題である。

## 5.2　ファイバー端面の扱い

WLSF の片側読みに対しては、一般的に光量の増加を期待してアルミナイズドマイラーなどで MPPC の逆側ファイバー端面を加工している場合が多い。今回、逆側端面の扱いを詳細に知るため、ファイバーに何も施さない場合 (ブラックシートを押し当てる)、アルミホイルを端面に押し当てて接触させた場合反射材を塗布した場合、の 3 通りにおいて、$^{90}$Sr 線源を用いて評価を行った。反射材は押し出し型シンチレータに塗布されているものと同様の ELJEN TECHNOLOGY 社製 EJ-510 を用いた (図 5.8)。また、EJ-510 の反射効率を示したグラフを図 5.9 に示す [19]。

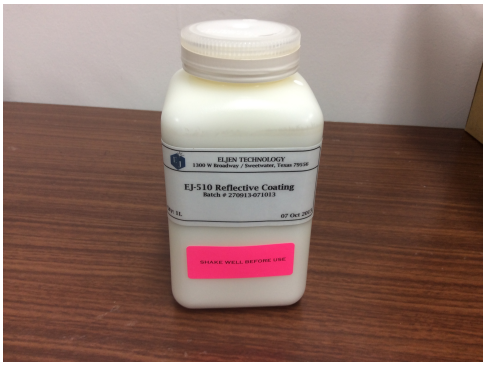


図 5.8　酸化チタン反射材、ELJEN TECHNOLOGY 社製 EJ-510

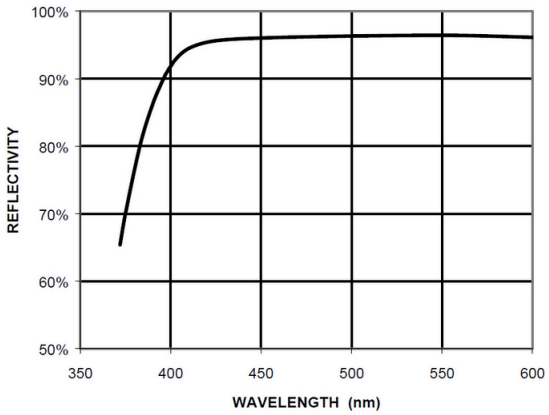


図 5.9　EJ-510 の基礎性能 (反射効率 vs 光の波長)。シンチレータの発光波長である 430nm 程度では反射率 95% 以上を有する。

試験は、Y-11(200)MS を押し出し型シンチレータへ通し、MPPC で光検出を行う。MPPC の読み出しには EASIROC MODULE を使用し、HOLD 信号には線源によるセルフトリガーを用いた。線源の位置は、MPPC 側のシンチレータ端面から 32.5cm、22.5cm の位置に設置し、Y-11(200)MS 二本について同じ測定を行った。線源を動かす際には他の機器には触れないようにし、ファイバーを変えるとき、加工するときも可能な限り他の条件が変化しないようにした。測定のセットアップの簡略図を図 5.10 に示す。

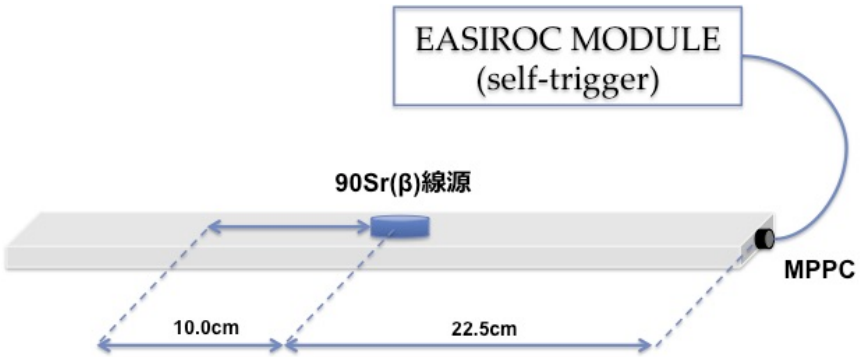


図 5.10　ファイバー端面チェック時のセットアップ概略

測定より得られた結果をそれぞれ表 5.2、表 5.3 に示す。ただし、MPPC ピクセル間のクロストークなどの補正はかけていない。

表 5.2　$^{90}$Sr 線源 (MPPC から 32.5cm) によるファイバー端面を加工したときの光量測定

| | ブラックシート光量 (p.e.) | アルミホイル (p.e.) | EJ-510 (p.e.) |
|---|---|---|---|
| ファイバー A | 17.4±0.01 | 18.6±0.01 | 17.8±0.01 |
| ファイバー B | 13.9±0.03 | 15.9±0.01 | 16.2±0.01 |

表 5.3　$^{90}$Sr 線源 (MPPC から 22.5cm) によるファイバー端面を加工したときの光量測定

| | ブラックシート光量 (p.e.) | アルミホイル (p.e.) | EJ-510 (p.e.) |
|---|---|---|---|
| ファイバー A | 17.6±0.01 | 18.9±0.01 | 18.1±0.01 |
| ファイバー B | 13.8±0.03 | 16.0±0.01 | 15.0±0.01 |

ファイバーA，ファイバーBとあるのはそれぞれ、一回目、二回目で測定したファイバーである。これを見ると、MPPC 逆側端面を加工することでいずれも光量の回復が見て取れるが、線源の位置に対する依存性は有意には見られない。一方、一回目、二回目で根本的に光量が変わってしまっており、ファイバーと MPPC の接続が固定されていないことに由来していると考えられるが、光量回復の効果は総じてアルミホイルを当てた場合の方が大きいことが判明した。

## 5.3　考察

以上の性能評価に関してまとめる。

- シンチレータ間クロストーク

実機において考慮すべき 45cm × 1cm の面におけるシンチレータ間のクロストークを宇宙線を用いて調べた。宇宙線により得られた光量は平均で約 35p.e. 程度であり、この光量に対するクロストーク現象は観測されなかった。これは 45cm × 5cm の面と 45cm × 1cm の面で反射材コーティングの厚みが異なっており、45cm × 1cm の面におけるコーティングが十分に厚いためであると考えられる。しかしながら、HIMAC テスト実験で得られたように、実機で用いる際には平均で 50p.e. 程度の光量に対してクロストークが起こらないだけの性能があることを確認する必要がある。また、シンチレータコーティングにも個性があり、個体によってはコーティングが薄いものもあるため、実際に使用する際にはそれらの個性も考慮しなければならない。

- ファイバー端面の扱い
  Y-11(200)MS に対して、MPPC 逆側端面に反射加工 (未加工、アルミ、EJ-510) をすることで光量が回復するかどうかを $^{90}$Sr 線源を用いて調査した。その結果、反射加工をすることで光量の回復が見て取れ、アルミホイルの場合において最大 14% の光量回復効果が得られた。そのため実機においても反射加工を行い、光量の回復を狙う。

# 6　結論と今後の方向性

核物質の EOS は核物質の物性を理解する上で非常に重要であるが、非対称核物質における対称エネルギーの密度依存性に未だ大きな不定性が残されているが故に、究極の非対称核物質ともいえる中性子星の基本的な物理の多くが未解明のままである。非対称核物質における対称エネルギーを精査するプローブが重イオン衝突であり、RIBF の SAMURAI スペクトロメータ内部に設置される SπRIT-TPC 及び、中性子検出器などを用いて高密度領域の対称エネルギーを探るべく SπRIT 実験が計画され、来年度より本格的に物理ランが開始される予定である。SπRIT 実験をはじめとする重イオン衝突実験においては、検出するイベントが中心衝突か周辺衝突かを判別することが非常に重要であるため、衝突係数と強い相関を持つ反応の多重度を測定することにより、間接的に衝突係数の情報を得ることが必要不可欠である。SπRIT 実験においては、より対称エネルギーの情報を残しているとされる中心衝突を選択的に取得するために、多重度に閾値を設定してトリガー信号を生成するトリガー系を開発、使用する。

当該トリガー系の粒子検出部は SπRIT-TPC の両側面に 30 本ずつ並べて配置されるシンチレータであり、中心衝突からの陽子を主とする荷電粒子との反応によって生じるシンチレーション光を波長変換ファイバーと MPPC により読み出す。MPPC からの信号は EASIROC を用いて読み出し、その各チャネルの Discriminator 出力から多重度の計算及びトリガー信号生成を FPGA により行う。本論文は FPGA 内部の多重度トリガー生成ロジックの開発及び、SπRIT 実験において考慮すべき陽子などに対するシンチレータの応答についての性能評価を行った結果を述べたものである。

SπRIT-TPC のトリガー系には信号生成時間に対する要請があるが、作成した多重度トリガーのロジックを FPGA に実装し、簡易テストを行ったところ、モジュール内部のみの遅延時間が約 52ns となることを示し、要求性能内であることを確認した。次に HIMAC にてテスト実験を行い、300MeV/A$^{132}$Xe ビームを CsI ターゲットに照射することで、重イオン衝突により生じる荷電粒子が飛来するという環境を再現し、光量などの応答を調べた。その結果、MPPC から最大 37.5cm 離れた位置に入射したときでも少なくとも 50p.e. 程度の光量が得られることを確認し、ポアソン分布を仮定すれば、5p.e. 程度の MPPC ノイズに対して十分な閾値を EASIROC においてかけたとしても検出効率が 99% 以上得られることが期待できることが判明した。また、テスト実験中に生じた多重度トリガーの発行ミスの原因を考察し、自作の電源分岐基板において、信号線のクロストークがあることを確認した。

トリガーアレイ実機の構成において考慮すべきシンチレータ間のクロストークとして、45cm × 1cm 面のクロストークが見られるかどうかを宇宙線により調査した。その結果、36p.e. 程度の光量に対しては有意にクロストークの存在は認められず、多重度計算の妨げとはならないことが判明した。しかしながら、実際の重イオン衝突実験において荷電粒子が入射したときに得られる光量は、HIMAC テスト実験で得られたように 50p.e. 以上であるため、更なる評価が必要である。そして、波長変換ファイバーの MPPC 逆側端面の加工をどのようにするかを決定するため、加工の有無によって MPPC で得られる光量が変化するかどうかを $^{90}$Sr 線源を用いて調べた。その結果、酸化チタン反射材を塗布した際は数 % の光量の増加しか認められなかった一方、アルミホイルを押し当てて伝送光の反射をさせた場合は最大 14% の光量の増加が確認された。実機では、更にアルミナイズドマイラーなどで光量回復効果のチェックをした後、端面の加工法を決定した後に最適なものを使用することを考えている。

今後は上述の判明した事項や既に評価されている内容を基に、更なる開発を進めていくことになるが、具体

的には、シンチレータの遮光による効率的なセグメント化、クロストークの生じない安全な MPPC バイアス電源分岐手法の考案、多重度計算ロジック部分の信号の高さに対する耐久性や大きな多重度を検出した際の計算の安定性、トリガー発行までにかかる遅延時間の改良、精密な測定、チャネル毎に時間差のある信号に対するアクセプタンス (受け入れ可能な時間) の評価などをしていく予定であり、SπRIT 本実験までに性能評価の完了及び実機完成を具体的に進める。

# 謝辞

本研究を進めるにあたって素晴らしい環境を与えてくださった皆様に心から感謝致します。指導教官である村上哲也講師には、右も左も分からない私に研究課題の提案をはじめとして、いつも方向性を指し示してくださり、導いて下さいました。普段の研究生活や実験の際にはよく体のことを労ってくださり、思いがけないところで心遣いを頂いていたことを感謝しています。研究の楽しさ、厳しさも少しは学ぶことができたのではないかと思っています。

東北大学の三輪浩二助教、塩崎健弘君には VME EASIROC の多重度計算ロジック開発の際にお世話になりました。FPGA のことに関してほとんどと言っていいほど無知である私に、ビームタイム直後という何とも忙しいタイミングにも関わらず、一からでほどきをしてくださいました。その後には VME EASIROC をお貸し頂き、その折は大変感謝しています。

理化学研究所研究員の西村美月氏には HIMAC テスト実験の際に、ほとんど尽きっきりで試験機の準備を手伝って頂きました。データ解析のプログラムまで改良してくださり、本当に有り難い限りです。美月さんがいなければテスト実験はどうなっていたことかしれません。Jerzy Lukasik 氏には GEANT4 シミュレーションのことに関して、様々なアドバイスを頂きました。質問した際には、GEANT4 の不慣れな私のために分かりやすく改良したコードを送って頂きました。

原子核ハドロン研究室の永江知文教授、川畑貴裕准教授、成木恵准教授、新山雅之助教、藤岡宏之助教には、研究の貴重な助言を頂きました。先輩である中塚徳継さんには常に研究の進捗を気にかけてくださり、京都に戻ってこられた際には多く手を貸して頂きました。その間、幾度となくご迷惑をお掛けしましたが、分からないことは何度も教えて頂き、ありがとうございました。同輩である、石井佑季君、竹中耕平君、村田求基君、山上大貴君とは何気ない雑談をしたり、愚痴を言い合ったりと、普段の研究生活を楽しいものにしてくれました。また、同回生に負けまいという思いが支えになったこともありました。ありがとうございます。

そして最後に、遠くからいつも心の支えとなってくれ、応援してくれた両親に心から感謝し、この場を借りてお礼申し上げます。本当にありがとうございました。

# 付録

## .1 △ アイソバーモデル

核子-核子散乱における $\pi$ 中間子生成の散乱振幅を $\Delta$ アイソバーモデルを用いて説明する。中間エネルギー重イオン衝突においては、$\Delta(1232)$ 共鳴状態を介して $\pi$ 中間子が生成されるのが主な経路となるが、その共鳴振幅は衝突係数 1fm の中心衝突においても約 2% 程である。核物質中の $\pi$ 中間子とバリオンの平均場ポテンシャルは未だよく知られていないため、$\Delta$ 共鳴状態のアイソスカラーポテンシャル部分を核子ポテンシャル、アイソベクトルポテンシャルを中性子・陽子ポテンシャルの平均と仮定して 400MeV/A 入射エネルギーにおける $^{132}$Sn+$^{124}$Sn 反応の $\pi$ 中間子生成の多重度を反応時間毎に示したグラフが図 A.1 である。

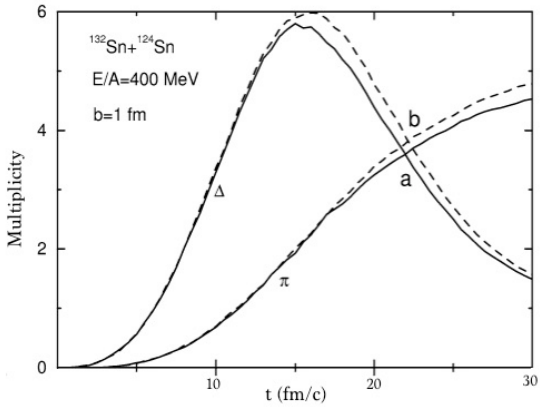


図 A.1　400MeV/A 入射エネルギーにおける $^{132}$Sn+$^{124}$Sn 反応の $\pi$ 中間子生成の多重度

図 A.1 を見ると、$t \sim 15fm/c$ で $\Delta$ アイソバーの多重度が極大を取っているのが分かる。

また、$\Delta \leftrightarrow \pi N$ プロセスのアイソスピン保存式は、Clebsch-Gordon 係数を用いて、以下のように書くことができる。

$$|\Delta^{++}\rangle = |\pi^+\rangle|p\rangle$$

$$|\Delta^{+}\rangle = \sqrt{\tfrac{2}{3}}|\pi^0\rangle|p\rangle + \sqrt{\tfrac{1}{3}}|\pi^+\rangle|n\rangle$$

$$|\Delta^{0}\rangle = \sqrt{\tfrac{1}{3}}|\pi^-\rangle|p\rangle + \sqrt{\tfrac{2}{3}}|\pi^0\rangle|n\rangle$$

$$|\Delta^{-}\rangle = |\pi^-\rangle|n\rangle$$

これを用いて、pp 反応が $\Delta(1232)$ を経由して $\pi$ 中間子と核子が生成される反応は、以下のように書ける。

$$|pp\rangle = \tfrac{\sqrt{3}}{2}|\Delta^{++}\rangle|n\rangle - \tfrac{1}{2}|\Delta^{+}\rangle|p\rangle = \tfrac{\sqrt{3}}{2}|\pi^+\rangle|p\rangle|n\rangle - \tfrac{1}{\sqrt{6}}|\pi^0\rangle|p\rangle|p\rangle - \tfrac{\sqrt{3}}{6}|\pi^+\rangle|n\rangle|p\rangle$$

以上の結果から、Wigner-Eckart の定理を用いると、$\pi$ 中間子の生成比は、

$$\pi^+ : \pi^0 : \pi^- = 5 : 1 : 0$$

となる。降演算子を作用させることで、残りの pn 反応、nn 反応も同様に計算できて、

$$|pn\rangle = \frac{1}{2}|\Delta^+\rangle|n\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}|\Delta^0\rangle|p\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}}|\pi^0\rangle|p\rangle|n\rangle + \frac{1}{\sqrt{6}}|\pi^+\rangle|n\rangle|n\rangle - \frac{1}{\sqrt{6}}|\pi^-\rangle|p\rangle|p\rangle - \frac{1}{\sqrt{3}}|\pi^0\rangle|n\rangle|p\rangle$$

$$|nn\rangle = \frac{1}{2}|\Delta^0\rangle|n\rangle - \frac{\sqrt{3}}{2}|\Delta^-\rangle|p\rangle = \frac{\sqrt{3}}{6}|\pi^-\rangle|p\rangle|n\rangle + \frac{1}{\sqrt{6}}|\pi^0\rangle|n\rangle|n\rangle - \frac{\sqrt{3}}{2}|\pi^-\rangle|n\rangle|p\rangle$$

となるので、同様にして核子-核子散乱における $\pi$ 中間子の生成比をまとめると、表 A.1 が得られ、(1.9) 式が導出される。

表 A.1　核子-核子散乱における $\pi$ 中間子生成比

| | $\pi^+$ | $\pi^0$ | $\pi^-$ |
|---|---|---|---|
| nn | 0 | 1 | 5 |
| pp | 5 | 1 | 0 |
| np=pn | 1 | 4 | 1 |

# 参考文献


[1] B. A. Li, L. W. Chen and C. M. Ko, Phys. Rep. 464 (2008), 113.

[2] D. H. Youngblood, H. L. Clark, and Y. W. Lui, Phys. Rev. Lett. 82. 691 (1998)

[3] P. Danielewicz, R. Lacey and W.G. Lynch, Science 298 (2002), 1592.

[4] I. E. Lagaris and V. R. Pandharipande. Nucl. Phys. A 369 (1981), 470.

[5] A. E. L. Dieperink, Y. Dewulf, D. Van Neck, M. Waroquier and V. Rodin, Phys. Rev. C 68 (2003), 064307.

[6] Tsang et al. Phys. Rev. C 86, 015803 (2012)

[7] Z. Y. Sun, M. B. Tsang, W. G. Lynch, Phys. Rev. C 82, 051603(R) (2010).

[8] Z. Kohley, L.W.May, S.Wuenschel, Phys. Rev. C 82, 064601 (2010).

[9] P. Danielewicz and J. Lee, AIP Conf. Proc. 1423, 29 (2012).

[10] J. Zenihiro, H. Sakaguchi, T. Murakami, Phys. Rev. C 82, 044611 (2010).

[11] A. Klimkiewicz, N. Paar, P. Adrich, M. Fallot, Phys. Rev. C 76, 051603(R) (2007).

[12] R. Stock, Phys. Rep. 135 (1986), 259.

[13] B. A. Li, Phys. Rev. C 67 (2003) 017601.

[14] B. A. Li, Nucl. Phys. A 708 (2002) 365.

[15] 川向裕之, T2K 長基線ニュートリノ振動実験ニュートリノビームモニター INGRID に用いるシンチレーターと光子検出器 MPPC の性能評価.
Master's thesis, Department of Physics, Kyoto University, Feb 2008.

[16] 五味慎一, 半導体光検出器 MPPC の性能評価システムの構築.
Master's thesis, Department of Physics, Kyoto University, Feb 2008.

[17] Omega group, [EASIROC DATA SHEET], (2011).

[18] 石島直樹, ATLAS アップグレード用シリコン検出器試験用システムの開発.
Master's thesis, Department of Physics, Osaka University, Feb 2014.

[19] ELJEN TECHNOLOGY EJ-510 データシート.
http://www.eljentechnology.com/index.php/products/paints/86-ej-510