

気球搭載宇宙硬X線偏光検出器
PoGOLiteの
主検出部の地上試験による性能実証

広島大学大学院 理学研究科 物理科学専攻
高エネルギー宇宙・可視赤外線天文研究室

M071517 吉田 広明

主査:深澤 泰司 副査:堀 利匡

2009年2月10日

概要

硬 X 線領域での偏光観測はこれまで未知であった磁場や降着円盤の構造を解明する新たなプローブとなる。しかし、X 線領域での偏光観測は非常に困難であり、現在までの観測例は「かに星雲」の約 30 年前の太陽観測衛星 OSO-8 による 10 keV 以下の観測と 2008 年に報告されたガンマ線天文衛星 INTEGRAL による 100 keV 以上の観測のみである。

我々は 2010 年の気球による偏光観測を目指し、宇宙硬 X 線偏光検出器 PoGOLite (Polarized Gamma-ray Observer Light version) の開発を進めている。これは 25~80 keV に感度を持ち、井戸型フォスウィッチ型のデザインを採用することで、大面積と低バックグラウンドの両立を実現し、6 時間の観測で「かにパルサー」から 10 % の偏光を検出できる等、かつてない感度を誇る。PoGOLite では 217 本の PDC と呼ばれるユニットを蜂の巣状に並べる。各ユニットは主検出部である減衰時定数の速いプラスチックシンチレータ (fast シンチレータ)、コリメータである減衰時定数の遅いプラスチックシンチレータ (slow シンチレータ)、シールド部である BGO と光電子増倍管からなっており、コンプトン散乱の異方性を利用することで偏光を測定する。PoGOLite は OSO-8 と INTEGRAL の間の帯域を高精度で測定可能なため、極めて重要なミッションとなる。

本研究では PDC19 ユニットから成る三層の蜂の巣構造のプロトタイプを作成し、KEK の X 線シンクロトロンビームを用いて主検出部のモジュレーションファクター (偏光測定性能:以下、MF) と検出効率を実測した。実証試験を行うためには、予め試験に用いる検出器とビームの情報を正確に把握する必要がある。そこで PoGOLite に比べデータ取得の効率は劣るが、正確に偏光度を測定できる偏光計をデザイン・製作し、試験に用いるビームの偏光度を測定した。また主検出部である fast シンチレータのエネルギー応答等を詳細に調べた上で、2008 年 2 月に KEK PF BL14-A にて実証試験に臨んだ。本試験ではフライトデザインの検出器・読み出し装置が用いられ、実機と同等の構成での試験となった。その結果、検出器の MF および検出効率かがシミュレーションによるデザイン値を 5 % 程度以下の精度で一致することを実証した。

目次

第1章	序章	7
1.1	研究の背景	7
1.2	研究の目的	7
第2章	硬 X 線偏光観測	9
2.1	偏光とは	9
2.2	偏光観測の意義	9
2.2.1	降着円盤の幾何学構造	9
2.2.2	回転駆動型パルサーの放射機構	10
2.3	偏光計	10
2.3.1	散乱型偏光計	11
2.3.2	モジュレーションファクター	13
第3章	PoGOLite 検出器	15
3.1	PoGOLite プロジェクトの概要	15
3.2	PoGOLite 検出器	16
3.2.1	シンチレータ	16
3.2.2	光電子増倍管	16
3.2.3	PoGOLite 検出器の主検出部	17
3.3	PoGOLite 検出器の読み出しシステム	20
3.3.1	衛星搭載機器間通信規格 SpaceWire	20
3.3.2	SpaceWire Board	21
3.3.3	SpaceCube	22
3.3.4	PoGOLite 検出器のデータ収集システム	22
第4章	KEK ビームの偏光度測定試験	25
4.1	キャリブレーション用偏光計とその製作	25
4.1.1	キャリブレーション用偏光計	25
4.1.2	簡易偏光計の製作とシミュレーションによる偏光計の評価	26
4.2	簡易偏光計のキャリブレーション試験	28
4.2.1	予備試験	29
4.2.2	SPring-8 実験	31
4.3	KEK ビーム偏光度測定試験	36
第5章	fast プラスチックシンチレータの特性試験	41
5.1	エネルギー応答の非線型性	41
5.2	集光率の位置依存性	44

第6章	19ユニットプロトタイプの上試験	47
6.1	目的	47
6.2	ビーム試験のセットアップとデータ取得	48
6.3	2ヒットイベントにおける性能評価	52
6.3.1	解析方法	53
6.3.2	結果	56
6.4	3ヒットイベントにおける性能評価	60
6.4.1	解析方法	61
6.4.2	結果	62
第7章	まとめと今後	67

目 次

2.1	降着円盤での散乱角による偏光の異なり	10
2.2	パルサーの放射モデルによる偏光パターンの違い	11
2.3	コンプトン散乱の概念図	11
2.4	偏光した光子がコンプトン散乱された際の概念図	12
2.5	散乱型偏光計の概念図	13
2.6	モジュレーションファクターの θ 依存性 [6]	14
3.1	PoGOLite 検出器が搭載される気球ゴンドラ	16
3.2	光電子増倍管の構造の概念図	16
3.3	PoGOLite の検出器の模式図。217 本の PDC ユニットとその周りを 54 本の SAS ユニットから構成されている。	17
3.4	PDC ユニットの構造。fast プラスチックシンチレータ、slow プラスチックシンチレータ、BGO の三つのシンチレータと PMT から構成されている。	18
3.5	PoGOLite 検出器による偏光測定の方法。コンプトン散乱の異方性を利用して偏光を検出する。	19
3.6	PoGOLite 検出器の断面図	19
3.7	シミュレーションによる PoGOLite の有効面積 [15]	19
3.8	シミュレーションによる PoGOLite のモジュレーションファクタ [15]	19
3.9	データ取得時の出力波形。fast プラスチックシンチレータ、slow プラスチックシンチレータ/BGO シンチレータで、その減衰時定数の違いから波形の立ち上がり時間が異なる。	20
3.10	シミュレーションによるバックグラウンドスペクトル [15]。100 mCrab 程度に抑えられる。	21
3.11	SpaceCube の外観	22
3.12	Flash ADC Board	23
3.13	Digital I/O Board	23
3.14	PoGOLite データ収集システムのブロック図	23
4.1	シミュレーションによりデザインした偏光計	25
4.2	シミュレーションによるデザインに基づいて製作した偏光計	25
4.3	fast プラスチックシンチレータとその固定台	27
4.4	散乱体・吸収体間の距離による MF_{100} の依存性	28
4.5	回転の概念図	29
4.6	シミュレーションによるモジュレーションカーブ	29
4.7	ショットキー型 CdTe 検出器の 24 時間長期稼働試験のセットアップ	30
4.8	ショットキー型 CdTe	30
4.9	ショットキー型 CdTe によるスペクトル	30
4.10	通常型 CdTe 検出器の 24 時間長期稼働試験のセットアップ	30

4.11	通常型 CdTe	31
4.12	通常型 CdTe によるスペクトル	31
4.13	SPring-8 実験のセットアップ	32
4.14	SPring-8 BL20B2 に取り付けられた偏光計	33
4.15	SPring-8 実験で得られた fast プラスチック+PMT のスペクトル	33
4.16	CdTe スペクトル	34
4.17	CdTe セレクション後の PMT スペクトル	34
4.18	シミュレーションによる CdTe スペクトル	34
4.19	シミュレーションによる CdTe セレクション後の PMT スペクトル	34
4.20	SPring-8 50 keV ビームのモジュレーションカーブ	35
4.21	KEK PF BL14-A に取り付けられた簡易偏光計	36
4.22	KEK 偏光度測定時に得られた散乱体でのスペクトル	38
4.23	KEK 偏光度測定時における CdTe スペクトル	38
4.24	KEK 偏光度測定時における CdTe セレクション後の PMT スペクトル	38
4.25	得られた KEK50keV ビームのモジュレーションカーブ	39
4.26	KEK25 keV ビームのモジュレーションカーブ	40
4.27	KEK70 keV ビームのモジュレーションカーブ	40
5.1	KEK での実験の様子	41
5.2	エネルギー応答の非線型性測定のセットアップ	42
5.3	シンクロトロンビームの照射位置	42
5.4	光量の各スポットの位置による依存性	43
5.5	エネルギー応答の非線型性	43
5.6	エネルギー分解能のエネルギー依存性	44
5.7	集光率の位置依存性測定のセットアップ	45
5.8	Cd 線源を照射することで得られたスペクトル。BGO との境目からの距離 が黒 19 cm、赤 11 cm、青 3 cm	46
5.9	集光率の位置依存性	46
6.1	KEK PF BL14-A での実験模様	47
6.2	2 ヒットイベントによる散乱の異方性の測定概念	47
6.3	3 ヒットイベントによる散乱の異方性の測定概念	48
6.4	19 ユニットセットアップの概要および上流から見た各ユニットの配置	49
6.5	データ取得系のブロックダイアグラム	49
6.6	シミュレーションによる 50 keV ビームに対する中心ユニットのスペクトル (黒:生のシミュレーションスペクトル、赤:シンチレータの応答を含んだス ペクトル、青:両方の応答を含んだスペクトル)	51
6.7	シミュレーションによる 19 ユニットのジオメトリ	52
6.8	シンチレータの信号の立上りの違いについて:青で描かれた波形が元の波形、 赤が遅延させた波形、黄が 2 つの波形の差分。黄の波高値をそれぞれ fast 波高値、slow 波高値とする。	53
6.9	波形弁別による 2 次元ヒストグラム	54
6.10	シミュレーションによる中心ユニットと Inner Ring ユニットで得られるエ ネルギースペクトル	54
6.11	中心ユニットのエネルギースペクトル	55
6.12	2 ヒットイベントにおけるユニット 1 のエネルギースペクトル	55

6.13	2 ヒットイベント解析による InnerRing のモジュレーションカーブ	56
6.14	2 ヒットイベント解析による OuterRing1 のモジュレーションカーブ	56
6.15	2 ヒットイベント解析による OuterRing2 のモジュレーションカーブ	57
6.16	シミュレーションによる 2 ヒットイベント解析の InnerRing のモジュレーションカーブ	58
6.17	モジュレーションファクターの実測値とシミュレーションの比較	59
6.18	Efficiency の実測値とシミュレーションの比較 1。黒は実測値、赤はシミュレーション値	60
6.19	Efficiency の実測値とシミュレーションの比較 2。シミュレーション/実測値	60
6.20	3 ヒットイベントにおける 2 次元ヒストグラム。X:中心ユニットで検出されたエネルギー Y:イベント全体で検出されたエネルギー。3hit イベントのセレクションの最適化を計る。赤の点線で囲んだ領域が本解析でのセレクション領域	63
6.21	シミュレーションによる 3 ヒットイベントでの OuterRing のユニットで得られるエネルギースペクトル	63
6.22	3 ヒットイベント解析による OuterRing1 のモジュレーションカーブ	64
6.23	3 ヒットイベント解析による OuterRing2 のモジュレーションカーブ	64
6.24	シミュレーションによる OuterRing1 のモジュレーションカーブ	64
6.25	シミュレーションによる OuterRing2 のモジュレーションカーブ	64
6.26	3 ヒットイベントにおけるモジュレーションファクターの実測値とシミュレーションの比較	65
6.27	Efficiency の実測値とシミュレーションの比較 1。黒は実測値、赤はシミュレーション値	66
6.28	Efficiency の実測値とシミュレーションの比較 2。シミュレーション/実測値	66

表 目 次

3.1	SpaceCube の仕様	22
4.1	KEK ビーム偏光度測定時に取得したデータ	37
4.2	各データから得られたモジュレーションファクター	40
4.3	KEK ビーム偏光度の測定結果	40
5.1	エネルギー帯域とビーム照射スポット	43
6.1	各ユニットにかけられた HV 値とポアソンフィットにより求めた 1 photon ピークチャンネル	50
6.2	各ユニットのキャリブレーションの結果と 50 keV エネルギーに対する光量値	51
6.3	2 ヒットイベント解析における InnerRing の各ユニットの MF と MF_{100} . .	57
6.4	2 ヒットイベント解析における OuterRing1 の各ユニットの MF と MF_{100} .	57
6.5	2 ヒットイベント解析における OuterRing2 の各ユニットの MF と MF_{100} .	58
6.6	2 ヒットイベントにおける MF のまとめ: MF (実測値) と MF (シミュレーショ ン) が直接比較するべきものである。	58
6.7	2 ヒットイベントにおける Efficiency	60
6.8	3 ヒットイベント解析における Outer Ring1 の各ユニットの MF および MF_{100}	63
6.9	3 ヒットイベント解析における Outer Ring2 の各ユニットの MF および MF_{100}	64
6.10	3 ヒットイベントにおける MF のまとめ	65
6.11	3 ヒットイベントにおける Efficiency	65

第1章 序章

1.1 研究の背景

天体からの放射を観測する方法には、天体の像を得る撮像、天体の光度を測る測光、波長を分けてスペクトルを取得する分光、そして光の偏りとその方向を調べる偏光の4つの方法が挙げられる。電波や可視での領域においては上記の4つの方法が全て用いられ、観測が行われている。しかし、より高エネルギー側の波長であるX線・ガンマ線領域の観測においては、撮像・測光・分光の3つの方法は用いられてきたが、偏光観測は非常に困難なためほとんど行われていない。X線領域での現在までの観測例は「かに星雲」の太陽観測衛星OSO-8(1975~76)による10 keV以下の軟X線領域での観測と2008年に報告されたガンマ線天文衛星INTEGRALによる100 keV以上での観測の二例のみである。このように硬X線領域での偏光観測はいまだ開拓されていない分野である。しかし、この硬X線領域で偏光観測を行うことは、シンクロトロン放射やサイクロトロン放射・コンプトン散乱が絡んでいる天体において磁場や降着円盤の構造、天体からの放射機構等、これまで未知であった天体の物理を解明する新たなプローブとなるため、大きな期待が寄せられている。

そこで我々はこの硬X線領域での偏光観測の分野を発展させるべく、2010年の気球による偏光観測を目指し、宇宙硬X線偏光検出器PoGO Lite (Polarized Gamma-ray Observer-Light version)の開発を進めている。このPoGO Liteはコンプトン散乱の異方性を利用した偏光計である。そのデザインには「すざく」衛星に搭載されている硬X線検出器にも用いられた井戸型フォスウィッチ型のが採用されており、散乱体・吸収体を兼ねたPDCと呼ばれるユニットを217本、蜂の巣構造に並べる。これにより、大面積と低バックグラウンドを両立し、6時間の典型的なフライトで「かにパルサー」程度の明るさの天体からの10%程度の偏光を有意に検出できる等、かつてない感度を誇る。また、その検出領域は25~80 keVであり、OSO-8とINTEGRALの間の帯域を高精度で測定することができるため、重要なミッションとなる。

1.2 研究の目的

検出器による観測性能の予想や、観測データの解析のための検出器の応答関数の構築には計算機によるモンテカルロシミュレーションが用いられる。そのシミュレーションプログラムの開発へのフィードバックやPoGO Liteの偏光検出能力を正確に評価すべく、これまでKEKのシンクロトロン光を用いて定期的に試験が行われてきた。特に2007年度にはPDC7ユニットの二層の蜂の巣構造から成るプロトタイプ検出器が製作され、その実証試験が行われている。本研究では、更に外周を一層増やしたPDC19ユニットによる三層の蜂の巣構造のプロトタイプ検出器を製作し、KEK(高エネルギー加速器研究機構)のPF BL14-Aにてその主検出部の性能実証試験を行った。

19ユニットにユニットを増やして試験を行うことで、検出効率が増すとともに、PoGOLiteによる本観測で得られるものとほぼ同等のイベントを扱うことが可能となる。また、本試験にはフライトデザインの検出器・読み出し装置を用い、更に、あらかじめ検出器のエネルギー応答などを詳細に調べた上で臨み、実機と同等の構成での偏光検出性能の評価・実証を目指した。

第2章 硬 X 線偏光観測

2.1 偏光とは

偏光とは電場及び磁場が特定の方向に偏って振動している光のことを指す。その電場ベクトルの軌跡の形により直線偏光、円偏光、楕円偏光に分類される。これらのうち直線偏光は振動面の分布が直線方向に限られる場合のことを呼ぶ。直線偏向の偏光度 P は

$$P \equiv \frac{N_{\parallel} - N_{\perp}}{N_{\parallel} + N_{\perp}} \quad (2.1)$$

で定義される。ここで N_{\parallel} は光の偏光方向の強度、 N_{\perp} はそれと垂直な方向の強度である。また、 $P = 1$ のときを完全偏光、 $P = 0$ のときを無偏光とよぶ。天体からの放射が偏光していることは、その放射領域やメカニズムが非等方性を持つということを意味し、偏光観測を行うことで、放射機構に対し、重要な知見を得ることが出来る。

2.2 偏光観測の意義

天体からの放射の観測手段としては、強度を測る測光、エネルギースペクトルを得る分光、イメージを取得する撮像、電場・磁場の方向の偏りを測定する偏光の四つが挙げられる。天体から放射される偏光は主にシンクロトロン放射・サイクロトロン放射・コンプトン散乱によって生じるため、この偏光が検出される天体の多くは磁場や散乱を持つ非熱的な系である。この偏光を観測することは、これらの磁場や散乱を引き起こす物質の幾何学構造や放射機構の情報を探ることと同意である。本節では、特に硬 X 線領域で偏光観測を行うことで、解明できる天体現象について述べていく。

2.2.1 降着円盤の幾何学構造

X 線連星系に存在するブラックホールや中性子星、セイファート銀河の中心に存在するブラックホールの周りには降着円盤と呼ばれる円盤状のガスが存在する。この降着円盤は、大量のガスや塵などが、ブラックホールや中性子星などの中心天体の重力によって落下し、天体の周りに形成される。この落下の際に重力エネルギーが解放されることで X 線が放射される。しかし、X 線天文衛星 Chandra の持つ、現在世界最高の空間分解能をもってしても、ブラックホールの降着円盤の幾何学構造を分解するほどの性能は持っておらず、撮像観測でこれを探ることは不可能である。しかし、偏光観測を行うことで、間接的にこの降着円盤の幾何学構造を解明することが出来る。

ブラックホール等の降着円盤を持つ天体の周辺では X 線が放射されている。この放射起源にはブラックホール周辺で開放された X 線放射が、降着円盤によって散乱されたものであると考えられる。この散乱の角度によって光子の偏光度は異なる。たとえば、降着円盤を真上から見る場合、様々な方向に散乱された光子を見ることとなり、放射は無偏光と

なる。真横から見た場合には、ある特定の方向に散乱された光子を観測することとなり、放射は直線偏光となって観測される(図 2.1)。このように天体を見る方向によってその放射の偏光度、偏光ベクトルは異なってくる。これを利用することで、ブラックホールまわりの降着円盤の幾何学構造ひいては高エネルギー放射機構を X 線偏光観測によって探ることができる。

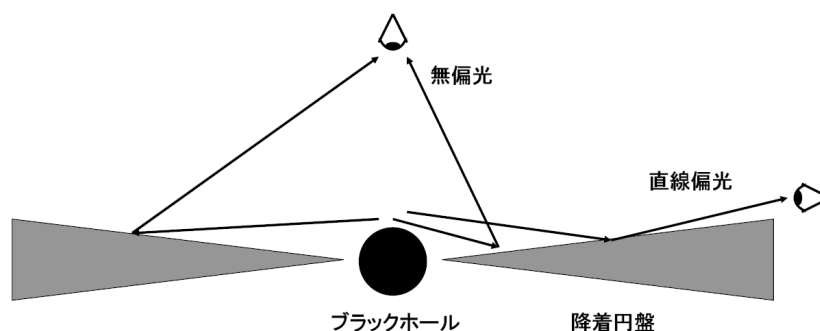


図 2.1: 降着円盤での散乱角による偏光の異なり

2.2.2 回転駆動型パルサーの放射機構

X 線偏光観測によって解明が期待されるもう一つの例として、回転駆動型パルサーの放射機構が挙げられる。高速回転している中性子星パルサーからは周期的なガンマ線放射が観測されており、これはパルサー磁気圏内で中性子星の磁力線に沿って運動している相対論的粒子から放射されていると考えられている。この放射は磁力線を含む面内に偏光していると考えられるが、磁気圏内のどこで粒子が加速されているのかは理解されていない。これを説明する回転駆動型パルサーの放射モデルとして、その放射領域の違いによって Polar Cap Model、Outer Gap Model、Caustic Model と呼ばれる 3 つのモデルが提唱されているが、これまでの分光や測光観測ではどのモデルが正しいのかを決定するまでには至っていない [6]。これらの放射モデルでは図 2.2 で示されるように、その偏光パターンは全く異って予想されることになる。硬 X 線偏光観測を行うことで、この議論に決着をつけることができるとして期待されている。現在活躍中のフェルミガンマ線衛星は GeV 領域のエネルギースペクトルの折れ曲がり方からパルサーの放射モデルに制限をつけることが可能であるが、それと相補的な役割を持ち、解釈をゆるぎないものにすることができる。

2.3 偏光計

偏光測定の方法

硬 X 線領域での偏光観測は、粒子性が非常に強いため、電波波長や可視光での偏光観測のように偏光板を用いた方法は不可能である。そこで、X 線領域での観測に用いられる検出器は、光電効果・ブラッグ反射・コンプトン散乱が用いられた偏光計となる [6]。以下ではこれらの偏光計のうち、PoGOLite 検出器にも採用されているコンプトン散乱を用いた偏光計について述べていく。

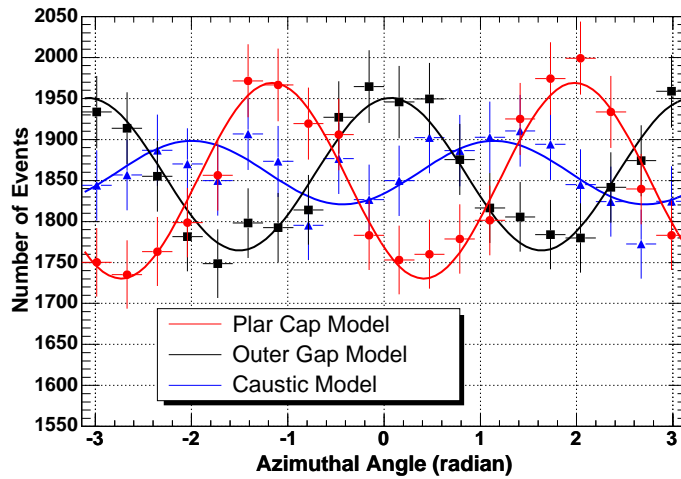


図 2.2: パルサーの放射モデルによる偏光パターンの違い

2.3.1 散乱型偏光計

コンプトン散乱は光子と電子が衝突し、光子が散乱することで互いの所持しているエネルギーと運動量をやり取りする光子と物質の相互作用である。(図 2.3) 硬 X 線から軟ガンマ線の約 25keV ~ 1MeV 付近の帯域において、このコンプトン散乱は光子と物質の相互作用の中でも支配的なものとなる。

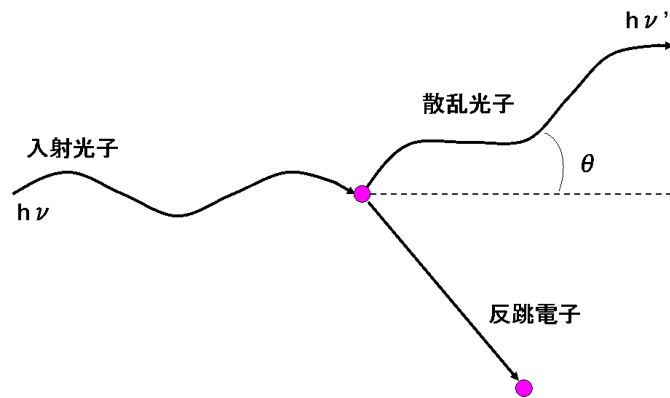


図 2.3: コンプトン散乱の概念図

コンプトン散乱の過程において、散乱角 θ で散乱された光子がもつエネルギー $h\nu'$ は

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_e c^2} (1 - \cos\theta)} \quad (2.2)$$

で表される。ここで、 $h\nu$ は入射 X 線光子のエネルギー、 m_e は電子の静止質量 (511 keV) である。

このコンプトン散乱の微分反応断面積 $d\sigma/d\Omega$ は Klein-Nishina の式と呼ばれる、

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{2} r_0^2 \left(\frac{k_0}{k_c}\right)^2 \left(\frac{k_c}{k_0} + \frac{k_0}{k_c} - 2\sin^2\theta \cos^2\phi\right) \quad (2.3)$$

で表される。

ここで r_0 は古典電子半径であり、 $r_0 = \frac{e^2}{4\pi m_e c^2}$ である。 k_0 、 k はそれぞれ入射光子、散乱光子の運動量、 θ 、 ϕ は光子の入射方向にたいする散乱角及び偏光ベクトルに対する散乱方位角である (図 2.4)。 k_0 、 k はそれぞれの光子のエネルギー $h\nu$ 、 $h\nu'$ を用いることで $k_0 = \frac{h\nu}{c}$ $k = \frac{h\nu'}{c}$ として置き換えることができ、それらの比 $\frac{k}{k_0} = \varepsilon$ とすると式 2.3 は、

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_0^2 \varepsilon^2}{2} \left(\frac{1}{\varepsilon} + \varepsilon - 2 \sin^2 \theta \cos^2 \phi \right) \quad (2.4)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + \frac{h\nu}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (2.5)$$

と置き換えられる。

ここで $h\nu$ と θ が一定の時を考え、 A 、 B を正の定数としておくと、式 2.4 は、

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = A - B \cos^2 \phi \quad (2.6)$$

となる。ここで、 A 、 B は $A > B$ の関係を持つ。式 2.6 より、 $\phi = 90^\circ$ 、 270° の時、最大となるので、コンプトン散乱は偏光ベクトルと直角方向に起こりやすいと言える。これはコンプトン散乱の異方性として知られており、この散乱方向の分布を調べることで偏光を測定することが可能となる。この性質を利用したものが散乱型偏光計であり、PoGO Lite もこの散乱型の偏光計である。

上述のように、偏光は偏光ベクトルに対し垂直に最も散乱されやすく、散乱の異方性が見られるという性質を持つ。偏光を検出するには、これを利用し、偏光を持つ光子をコンプトン散乱を起こしやすい物質 A (以下、散乱体) に照射する。そこで散乱された光子を回りに配置した検出器 B (以下、吸収体) で検出し、そのカウント数の ϕ 依存性を見ることで、散乱の異方性を調べるという方法をとる (図 2.5)。この検出される光子のカウント数は式 2.6 より、 ϕ について周期 π で変調することがわかる。

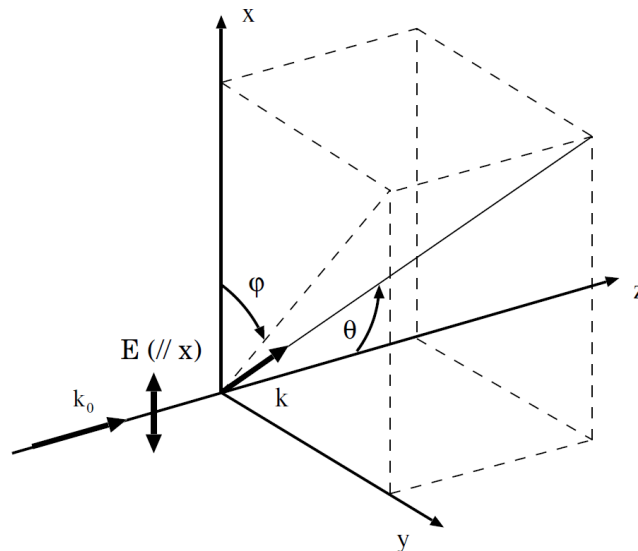


図 2.4: 偏光した光子がコンプトン散乱された際の概念図

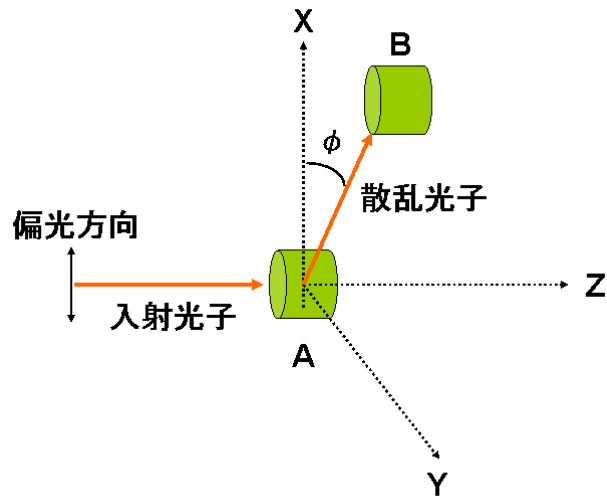


図 2.5: 散乱型偏光計の概念図

2.3.2 モジュレーションファクター

散乱型偏光計の性能の指標のひとつにモジュレーションファクター MF とよばれるものがある。 MF は

$$MF \equiv \frac{N_{max} - N_{min}}{N_{max} + N_{min}} \quad (2.7)$$

として定義される。ここで、 N は偏光した入射光子に対し、検出された散乱光子のカウンtrateであり、その変調の中で最大値を N_{max} 、最小値を N_{min} とした。特に入射光子が 100 % 偏光している場合のモジュレーションファクターを MF_{100} とし、その偏光計固有の性能を示す。このパラメーター MF_{100} は完全偏光に対して装置により偏光由来の異方性がなまされていない度合を示す値であり、 N_{min}/N_{max} がより小さいほど、 MF_{100} は 1 に近付き、偏光の情報をよく保っていることを示す。

この MF は偏光計の散乱体・吸収体の位置関係 (散乱角 θ) によっても依存している。図 2.6 は様々なエネルギーの偏光に対し、無限小のサイズの散乱体・吸収体を用いた際のモジュレーションファクター MF_{100} を散乱角 θ の関数としてプロットしたものである。このような理想的な偏光計を用いても、 θ が 90 度から外れた散乱を扱った場合、 MF_{100} を小さくしてしまう事が分かる。

ある散乱型偏光計において、偏光度が P の入射光子に対するモジュレーションファクター MF_{obs} 、偏光度が 100 % の入射光子に対するモジュレーションファクター MF_{100} としたとき、その関係は

$$MF_{obs} = P \times MF_{100} \quad (2.8)$$

となり、予め MF_{100} を知っておくことでこの関係から偏光度を求めることができる。 MF_{obs} が小さい場合、偏光による変調が小さく、その統計誤差の範囲に入ってしまうため、偏光しているかどうかの分かりにくい。しかし、 MF_{100} が大きな偏光計を扱う場合、測定する偏光度 P が小さい時でも MF_{obs} は大きくなり、小さな不定性で偏光度を測定することが可能となる。よって MF_{100} がより大きい偏光計ほど性能が良く、これは「散乱体と吸収体の角度 (散乱角 θ) を 90 ° に制限する」、「散乱体・吸収体のサイズを小さくする」などの手段によって大きくすることができる。実際の天体観測では天体の光度が限られ、ま

たバックグラウンドが存在するため、有効面積やバックグラウンド除去もあわせてデザインの最適化を図る。

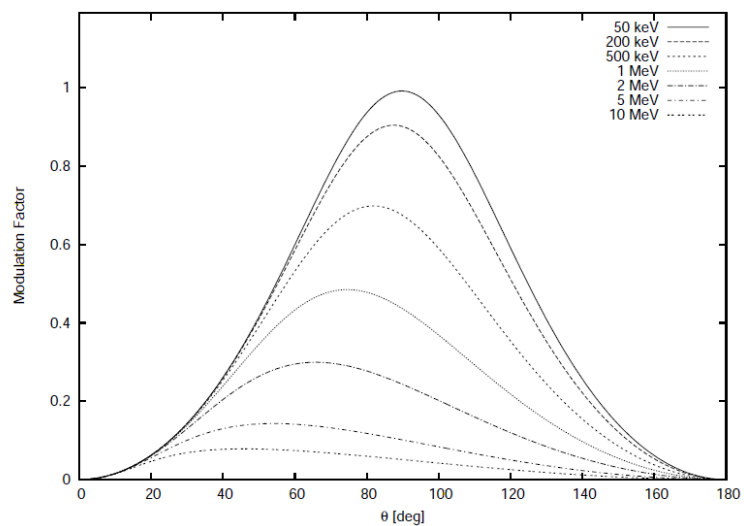


図 2.6: モジュレーションファクターの θ 依存性 [6]

第3章 PoGOLite検出器

3.1 PoGOLiteプロジェクトの概要

宇宙から放射される X 線やガンマ線は大気によって散乱・吸収され、地上まで届かないため、天体から放射されている X 線・ガンマ線を検出するためにはその検出器を衛星や気球に搭載して観測に臨む必要がある。その中で本研究で扱う PoGOLite プロジェクトは気球による硬 X 線偏光を狙ったミッションである。PoGOLite プロジェクトは元は 2004 年頃に気球による X 線偏光観測実験として発足した PoGO プロジェクトであり、もともとの装置のユニット数を約半分にし、到達高度を上げることで大気による X 線の吸収を減らし、感度をほとんど落とすことなく小型化を図った。気球による天体観測のメリットは衛星での観測に比べ、コストが安く、開発までの期間も短い点である。しかし、その一方で観測時間に制限がかけられるというデメリットを持ち合わせているため、検出器の低バックグラウンド化や高い有効面積が必要不可欠となる。

現在、2010 年の Engineering Flight での観測へ向けて、日欧米の国際協力により開発が進められている。日本からは広島大学、東京工業大学、山形大学、宇宙科学研究所が参加している。中でも、広島大学では読み出しシステムの開発と評価を、東京工業大学では読み出しに用いられる光電子増倍管の開発と評価を行い、また共同で検出部の試験やシミュレーションプログラムの開発を行っており、PoGOLite グループでも重要な役割を担っている。

PoGOLite 検出器は PDC とよばれる 217 本のユニットにより、コンプトン散乱の異方性を利用することで 25 ~ 80 keV の領域で偏光観測を行う。そのデザインには X 線天文衛星「すざく」の検出器にも採用されている井戸方フォスウィッチ型が採用されており、大面積と低バックグラウンド化を両立する。

これまで実験室においての検出部の各コンポーネントの詳細試験や、米国のアルゴンヌ国立研究所や日本の高エネルギー加速器研究機構のシンクロトロンビームを用いた 7 ユニットの PDC から成るプロトタイプの偏光測定性能試験、大阪大学の核物理研究センターのプロトンビームを用いた読み出しシステムの試験などが行われてきた。2008 年 2 月には本研究の主要部である 19 ユニットから成るプロトタイプの性能実証試験を高エネルギー加速器研究機構のシンクロトロンビームを用いて行った。本試験はフライトデザインの検出器、読み出しシステムを用いたことで、実機と同等の構成での試験となった。現在、2010 年の Engineering Flight(61 ユニット)での観測を目指し、気球ゴンドラの製作、PDC の量産、回路の改良などが進められている。

X 線帯域での偏光観測は困難であり、これまで有意な観測は「かに星雲」の太陽観測衛星 OSO-8 による 10 keV 以下での観測、ガンマ線天文衛星 INTEGRAL による 100 keV 以上での観測の 2 例しか存在しない。PoGOLite 検出器はこの 2 例の間の帯域を現在世界最高の感度で偏光観測を行うため、幕開けしたばかりの X 線偏光観測に大きな進展を与えると期待される。

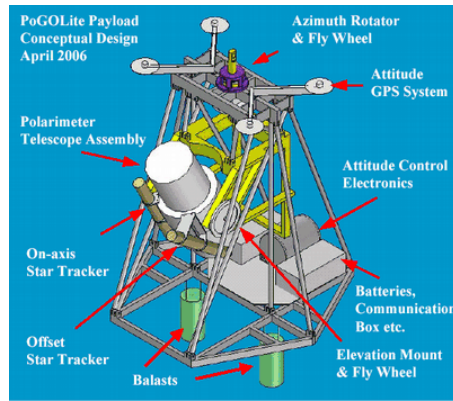


図 3.1: PoGOLite 検出器が搭載される気球ゴンドラ

3.2 PoGOLite 検出器

3.2.1 シンチレータ

シンチレータは電荷を帯びた粒子が当たることで蛍光を出す物質のことを指す。この蛍光はシンチレーション光とよばれ、粒子がシンチレータを通過する際、結晶の最外殻電子を励起し、その励起された電子が元の状態に戻る時に放出される光である。また、その光量は励起されたエネルギー順位と元の状態との差に応じている。

シンチレータは有機シンチレータと無機シンチレータの2種類のグループに分類される。有機シンチレータは一般に減衰時定数が短く、光量が小さい。一方、無機シンチレータでは減衰時定数が長く、光量大きい。PoGOLite 検出器には有機シンチレータであるプラスチック、無機シンチレータであるBGOを各々、主検出部、シールド部に用い、それらの信号の区別にこれらの特徴である減衰時定数の違いを利用する。

3.2.2 光電子増倍管

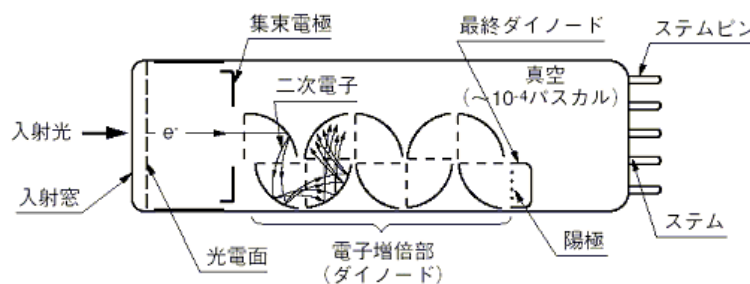


図 3.2: 光電子増倍管の構造の概念図

光電子増倍管 (PMT) は、光を読み出す検出器の一つであり、その中でも極めて高感度かつ高速応答な検出器である。PMTは高真空の容器の中に、光電面と呼ばれる光を電子に変換する陰極、集束電極、ダイノードと呼ばれる10個前後の電子増倍電極、アノードと呼ばれる電子を集める陽極などが封入された構造をしている(図3.2)。

光が光電面に入射することで光電効果が起こり、真空容器中に光電面から光電子が叩き出される。この光電子は集束電極によって第一ダイノードに導かれ、衝突を起こす。第一

ダイノードではこの衝突した一つの光電子が複数の二次電子を叩き出す。この二次電子はダイノードにかけられた電圧により加速されており、次の第二ダイノードによって同様の効果を生み出すことで更に増倍される。このように繰り返し増倍された電子はアノードに収集され、最終ダイノードまたはアノードで信号電流として出力される。

PMTにおける典型的な光電子増幅率は $10^6 \sim 10^7$ 倍にも達する。この増幅により、PMTは紫外線、可視光、近赤外線を観測に使用される検出器の中でも高感度、低ノイズである。またその高速応答性や、受光面のサイズの大きな物が製作できるなどの特徴を利点として持っている。

PoGOLite 検出器では、上述にある複数のシンチレータによって発光されたシンチレーション光を読み出すセンサーとして PMT を使用する。PoGOLite 検出器に用いられる R7899 は浜松ホトニクスと東京工業大学により共同開発された PMT である [16]。PoGOLite では観測エネルギーの下限値である 25 keV の X 線光子がコンプトン散乱を起こすときに落とす 2~3 keV のエネルギーを検出するため、R7899 は極めて低ノイズかつ高い集光効率を備えている。また、気球に搭載するための、軽量かつコンパクトであり、低消費電力という条件を満たすため、PMT と高圧電源が一体化されている PMT アセンブリとなっている。

3.2.3 PoGOLite 検出器の主検出部

PoGOLite 検出器では前述にもあるように気球による硬 X 線偏光検出を行う。気球が飛行する高度は 41~42 km であり、そのような環境では宇宙線や大気ガンマ線によるバックグラウンドイベントが非常に多い。そこで天体からの微弱な光を測定するためには、徹底されたバックグラウンド除去機能が必要となる。PoGOLite 検出器ではその主検出部に井戸方フォスウィッチカウンタと BGO アクティブシールドのデザインを採用し、低バックグラウンド化を実現する。

PoGOLite 検出器の主検出部は PDC(Phoswich Detector Cell) とよばれる 217 本のユニットが蜂の巣状に並び、それを取り囲む様に SAS(Side Anti-coincidence Shield) とよばれる 54 本のアクティブシールドユニットによって構成されている (図 3.3)

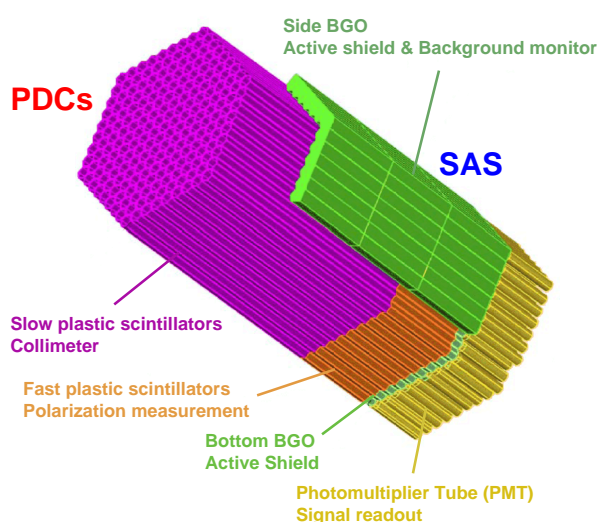


図 3.3: PoGOLite の検出器の模式図。217 本の PDC ユニットとその周りを 54 本の SAS ユニットから構成されている。

PDCユニット

主検出部を構成する PDC ユニットはと減衰時定数の短いプラスチックシンチレータ ($\tau \sim 2$ ns:fast プラスチックシンチレータ)、減衰時定数の長いプラスチックシンチレータ ($\tau \sim 230$ ns:slow プラスチックシンチレータ)、BGO シンチレータ ($\tau \sim 300$ ns) の時定数の異なる三つのシンチレータと光電子増倍管(以下、PMT) から構成されており(図 3.4)、三つのシンチレータの信号を一本の PMT で読み出す。

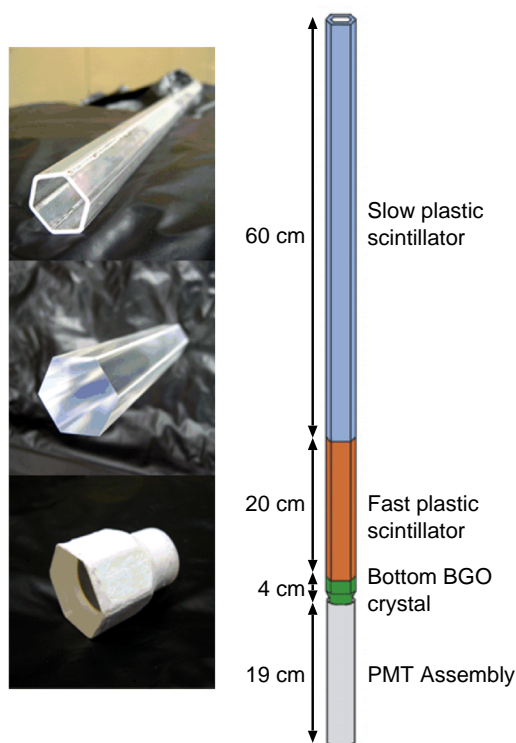


図 3.4: PDC ユニットの構造。fast プラスチックシンチレータ、slow プラスチックシンチレータ、BGO の三つのシンチレータと PMT から構成されている。

PDC ユニットの断面は 6 角形となっており、ユニットを蜂の巣上にすき間無く並べることができるとともに、4 角形のユニットを並べるよりもより散乱の角度を正確に測定できるという利点を持つ。また、主検出部に fast プラスチックシンチレータが採用されているのは、コンプトン散乱型偏光計の散乱体・吸収体としての役割を果たし、偏光測定とスペクトル測定を行う必要があり、検出領域である 25 ~ 80 keV においてコンプトン散乱を起こしやすい原子番号 Z の小さいシンチレータとして適しているためである。アクティブコリメータには加工しやすい slow プラスチックシンチレータが採用され、その構造は 60 cm の長さの中空となっており、これにより視野を $2.0^\circ \times 2.0^\circ$ に制限し、視野外からのバックグラウンド除去を行う。しかし、プラスチックでは高エネルギーの X 線に対する阻止能は小さいため、PDC ユニットにはパッシブシールドと呼ばれるスズ及び鉛の薄板が巻かれる。鉛は非常に阻止能が高く、より高いエネルギーであるガンマ線まで止めるが、光電吸収の際、約 74keV の特性 X 線を放射する。スズはこの特性放射線を吸収させるために使用されている。スズの特性 X 線は約 20keV であるため、PoGOLite の観測エネルギー帯域内ではほとんど影響しない。また Bottom 部には阻止能の高い BGO が採用され、検出器下面からのバックグラウンドに対するアクティブシールドとして機能する。

PoGOLite による偏光測定

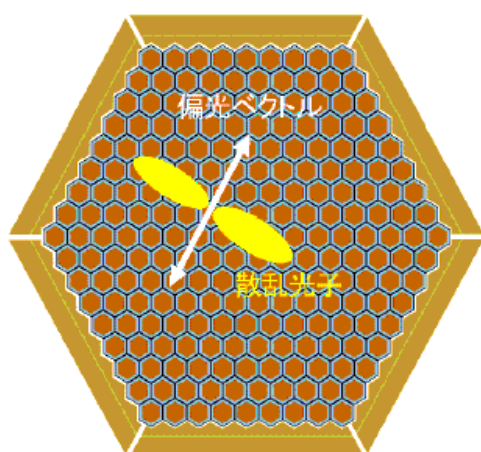


図 3.5: PoGOLite 検出器による偏光測定
の概念。コンプトン散乱の異方性を
利用し偏光を検出する。

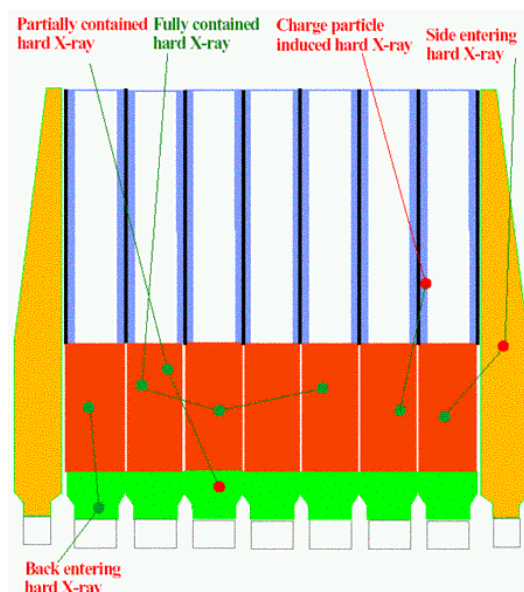


図 3.6: PoGOLite 検出器の断面図

前述のように PoGOLite 検出器は 217 本の PDC ユニートを蜂の巣上に並べて偏光を測定する。観測対象とした天体からの入射 X 線光子は PDC 内の主検出部である fast プラスチックシンチレータでコンプトン散乱を起こし、その散乱光がその周囲の別の PDC ユニートの fast プラスチックシンチレータで光電吸収あるいは再度コンプトン散乱を起こす。その反応したユニットに落としたエネルギーを測定し、コンプトン散乱イベントを追跡することで、散乱方向を測定することができる。偏光している X 線は偏光ベクトルに対し垂直な方向に散乱されやすいため (図 3.5)、多数のコンプトン散乱イベントを捉えることで、散乱光子の分布の偏りを知り、入射した X 線の偏光を調べることができる。また 217 本もの PDC ユニートを並べることにより大きな有効面積を実現できる。シミュレーションによる PoGOLite の有効面積、モジュレーションファクターを図 3.7、図 3.8 に示した。[15]

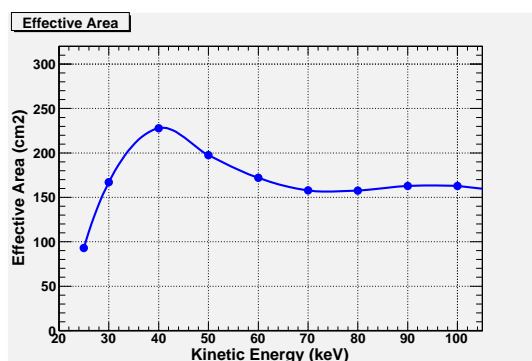


図 3.7: シミュレーションによる PoGO-
Lite の有効面積 [15]

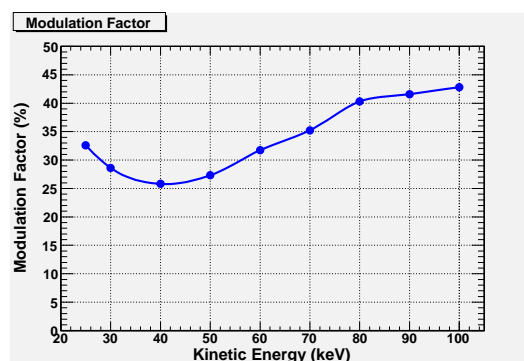


図 3.8: シミュレーションによる PoGO-
Lite のモジュレーションファクタ [15]

しかし、PoGOLite による観測が行われる 41 ~ 42 km の高度では、観測対象としている天体からの放射だけでなく、大気ガンマ線や大気中性子、および高エネルギー荷電粒子などのバックグラウンドイベントが非常に大きく、これらのイベントは絶えずあらゆる方

向から入射してくる。これらのバックグラウンドイベントのうち、側面や底面からやってくるものについては、主検出部のまわりに配置された SAS や Bottom BGO のアクティブシールドによって除去され、視野方向に関してもコリメータである slow プラスチックシンチレータによって低減することができる。中性子は BGO では効率良く阻止できないため、周りにポリエチレンを巻くことで低減する。

これらの fast プラスチックシンチレータ、slow プラスチックシンチレータ、BGO シンチレータの全ての信号を一本の PMT で読み出すため、それぞれの信号の区別をする必要がある。これらのシンチレータの減衰時定数は fast プラスチックシンチレータでは $\tau \sim 2$ ns、slow プラスチックシンチレータでは $\tau \sim 230$ ns、BGO シンチレータでは $\tau \sim 300$ ns と異なっている。それぞれの減衰時定数の違いから生じる、電荷有感型プリアンプ CSA の出力波形の立ちあがりの早さの違いを利用した波形弁別という手法をとる [5][6]。

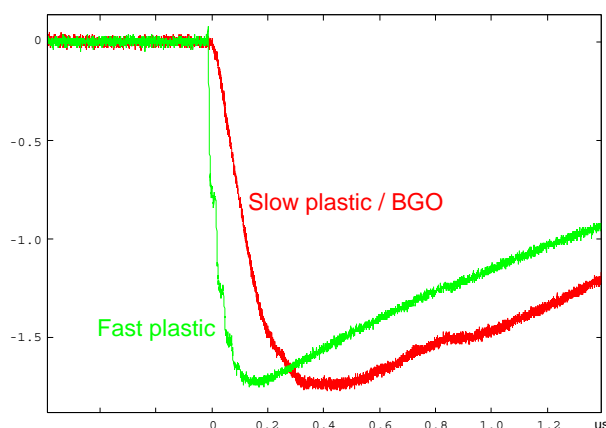


図 3.9: データ取得時の出力波形。fast プラスチックシンチレータ、slow プラスチックシンチレータ/BGO シンチレータで、その減衰時定数の違いから波形の立ち上がり時間が異なる。

上述のシールドが正しく機能した場合のバックグラウンドレートと 1 Crab、100 mCrab の観測対象の予想スペクトルが図 3.10 である。バックグラウンドの総量は 100 mCrab 程度に抑えられることがわかる。これらのような徹底したバックグラウンド除去、大きな有効面積、高いモジュレーションファクターにより、200 mCrab 程度の明るさの天体を対象としたとき、6 時間の観測で 10 % の偏光度を測定が可能になると予想されている。[5][15]

3.3 PoGOLite 検出器の読み出しシステム

3.3.1 衛星搭載機器間通信規格 SpaceWire

科学衛星には、観測装置やデータ処理装置、記憶装置、通信装置など様々な機器が搭載される。衛星のシステムが正しく機能するためにはこれらの機器間での通信は必要不可欠である。しかしながら、従来の衛星に搭載されたこれらの機器の通信インターフェイスは衛星、機器ごとの独自の規格に基づいて開発されてきた。この結果、開発期間の長期化や信頼性確保などの様々な問題が生じ、科学衛星開発にかかる負担は決して少なくない。そこで、これらの問題を解決するため、衛星搭載機器間の通信インターフェイスの世界統一規格として提唱されているのがこの SpaceWire である。この SpaceWire は現在、NASA や ESA、JAXA/ISAS など、世界の主要な研究機関、企業、大学などが開発に取り

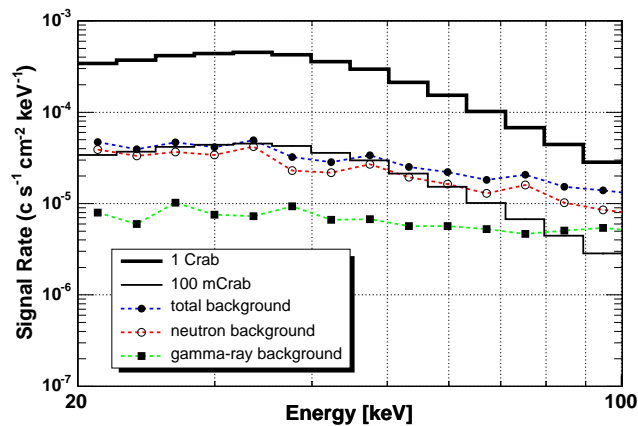


図 3.10: シミュレーションによるバックグラウンドスペクトル [15]。100 mCrab 程度に抑えられる。

組んでおり、2013 年打ち上げ予定である日本の X 線天文衛星 Astro-H 計画にも採用されている。全ての機器間の通信インターフェイスを統一することは、上述のような問題を解決し、また、機器同士の接続の自由度を増すことにも繋がり、柔軟なシステムの構築を可能にする。

SpaceWire のその他の利点としては高速通信でも消費電力が低く、ノイズに強く、信号線からのノイズの輻射も少ない。また、リンク速度は 2~400 Mbps で可変であり、様々な規模の装置に対応ができ、複数本の SpaceWire を束ねることでさらに高速な通信も行うことができる。SpaceWire はネットワークに対応しており、ルータを用いることで、様々なネットワークトポロジを構成できる。これにより、分散型の衛星システムを構築することができ、メッシュ状のネットワークトポロジを構成することで、一部のケーブルや機器に問題が生じた場合でもそこを迂回してデータ転送を行うことができ、高い信頼性の確保に繋がる ([5][14])。

PoGOLite 検出器のデータ取得システムのベースにはこの SpaceWire が使用されている。この PoGOLite プロジェクトの目的は硬 X 線偏光観測だけでなく、SpaceWire 自身の実証試験も兼ねており、SpaceWire によって開発されたデータ取得システムを使った地上実験および硬 X 線偏光観測を行うことで、その開発や技術の習得の早期実現を目指している。

3.3.2 SpaceWire Board

SpaceWire インターフェイスを実装した SpaceWire node として開発されたものに SpaceWire Board が挙げられ、PoGOLite で用いられる Flash ADC Board や Digital I/O Board (後述) もこれにあたる。SpaceWire Board には FPGA (Field Programmable Gate Array) とよばれるユーザーが自由に回路情報を書き換えられる LSI デバイスが搭載されている。FPGA に回路情報を書き込むには HDL (Hardware Description Language) 言語を用いる。これにより、回路動作をコンピュータプログラムのように記述することができ、大規模な回路を手軽に効率良く設計できるようになる。

SpaceWire Board には二つの FPGA が搭載されており、一つは SpaceWire や、その上位規格であり、CPU をもたない機器内のメモリやレジスタにアクセスできる Remote Memory Access Protocol (RMAP)[5][14] が実装された FPGA である。これは Board の様々な入出力機能を持たせている SpaceWire のプロトコルチップであり、SpaceWire FPGA とよば

れる。このFPGAはBoardの開発元(メーカー)が回路情報を書き込んでおり、Boardのユーザーは書き込むことができない。もう一方のFPGAはUser FPGAと呼ばれ、ユーザーが独自に開発した回路を書き込むことができる。二つのFPGAはExternal Busと呼ばれるバスで接続されており、SpaceWire FPGAを通して、User FPGA内のレジスタやメモリにアクセスすることが可能となっている。

3.3.3 SpaceCube

SpaceCubeはSpaceWireの開発プラットフォームとされている小型PCである(表3.1、図3.11)。SpaceCubeに搭載されたCPUはMIPSアーキテクチャのVR5701が使用され、LANやUSB、RS-232Cなどの他に、SpaceWireを3ポート備えている。そのOSにはT-EngineやLinuxが対応しているが、現在ではリアルタイム性に優れているT-Engineが主流となっている。このT-Engine版SpaceCubeにおいてはSpaceWireドライバが提供され、RMAPの機能が実装されている。このSpaceCubeは民生用部品を使用して作られているため、地上で開発する限りでは、低コストかつ高機能でSpaceWireの開発環境を構築することができる。

CPU	VR5701 200 MHz / 250 MHz / 300 MHz
Flash ROM	16 MB
DRAM	DDR SDRAM 64 MB
INPUT	IEEE1355(SpaceWire),RTC,CF(True
OUTPUT	IDE),XGA(1024×768),USB1.1, LAN(100BASE),Audio(Stereo), RS232C,JTAG I/F(Debug)
POWER	+5 V
SIZE	52 mm × 52 mm × 55 mm

表 3.1: SpaceCube の仕様



図 3.11: SpaceCube の外観

3.3.4 PoGOLite 検出器のデータ収集システム

PoGOLiteプロジェクトではSpaceWireの実証試験も兼ねられているため、そのデータ収集システムにはSpaceWireが用いられている。そのSpaceWireのデータ収集システムにはFlash ADC Board(FADC Board:図3.12)、Digital I/O Board(DIO Board:図3.13)、SpaceCubeによって構成されている(図3.14)。PMTのダイノード信号はFADC Boardに搭載された8つのCSA(Charge Sensitive Amplifier)に入力され、その出力信号は直ちにADCに入力されデジタル化される。このデジタル化された波形データはUser FPGAに送られ、FPGA内に構築されたデジタル回路によって処理される。その際、トリガー信号がDIO Boardに出力され、その信号が有効なイベントと判断された場合、FADC Board

に波形保存のトリガーが返される。このようにして保存された波形データは SpaceWire FPGA、SpaceCube を通して、PC に保存される。

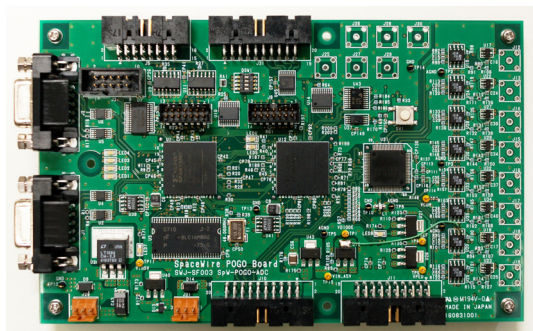


図 3.12: Flash ADC Board

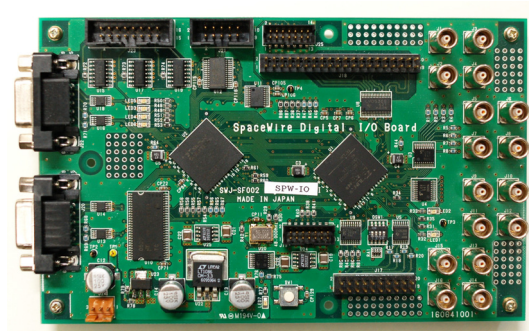


図 3.13: Digital I/O Board

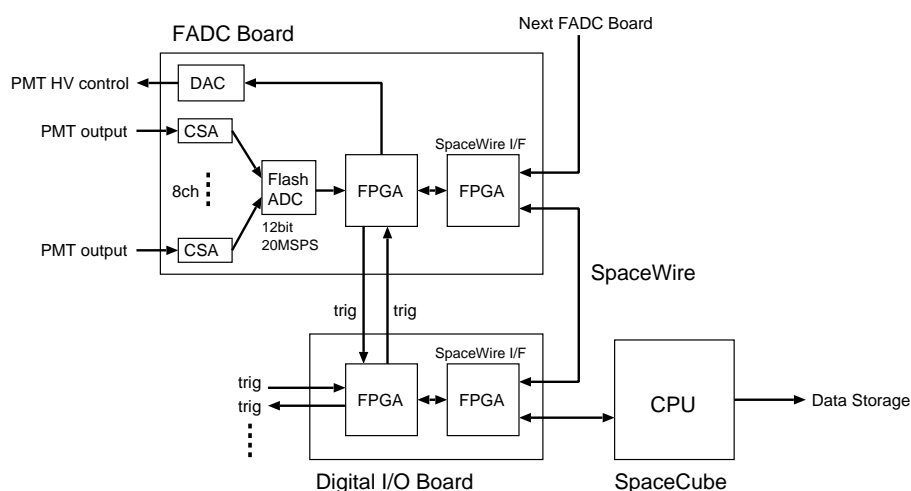


図 3.14: PoGOLite データ収集システムのブロック図

PoGOLite 検出器の上記のデータ収集システムを可能にするために、FADC Board には「ADC の設定レジスタに値を書き込むシリアルインターフェイス回路」「ADC から送られてくるシリアルデータをパラレルに変換するための Deserializer」「PMT の HV 電圧を設定するための DAC に設定値を書き込むシリアルインターフェイス回路」などを始めとするいくつかの機能が広島大の田中や東京工業大学河合研究室の植野らによって実装されている。以下にこれらについて簡単に記載する。(詳細は 2008 年 広島大 田中修論参照 [5])

FADC Board に使用されている ADC は 8ch 入力 12bit のパイプライン型 ADC であり、User FPGA に接続されている。この ADC 内部の設定レジスタを変更するためのシリアルインターフェイスが備えられており ADC を動作させるためにはレジスタの設定が必要となる。本研究で用いられている FADC Board には広島大 田中によって作成された ADC 設定用シリアルインターフェイスモジュールが作成されている。これには、SpaceWire 経由に ADC の設定値が書き換えられる仕様になっており、SpaceWire からシリアルインターフェイスモジュールに設定値を書き込むと直ちに ADC 内のレジスタに反映される。

また、PoGOLite で用いる PMT は高圧電源が内蔵されており、この高圧電源は +12V の電源からリファレンス電源として外部から印加された電圧に比例した高圧出力を生成し、外部印加電圧のおよそ 250 倍の高圧が PMT にかかる。例として、外部印加電圧が 5V だった場合、PMT にかかる電圧は約 1250V となる。また、このリファレンス電源

は FADC Board 内の DAC (Digital to Analog Converter) によって生成することが可能であり、これを用いることで、PMT 一本一本について個別に高圧電源の電圧値を設定することが可能となっている。DAC の出力値も ADC 用と同様なシリアルインターフェイスモジュールで書き込み、SpaceWire から自由に DAC の出力値 (PMT の電圧) を書き換えられるようにされている。また、PMT の破損を防ぐため、SpaceCube 上のソフトウェアによって、PMT の高圧電源が急激な変化をおこさないように制御されている。

この他にも FADC Board には PDC のデータ取得に必要となる固有の機能が実装されている。PDC では前述のように一本の PMT で読み出す三つのシンチレータの信号を区別するために波形弁別という手法が用いられるが、高精度の波形弁別を観測中に行うことは困難である。そこで解析時の自由度を高くするという目的も兼ね、PoGOLite では CSA での出力波形をそのまま保存し、オフラインの解析時に手動によって波形弁別を行う。また、観測中も FADC Board では簡易的な波形弁別を行い、trigger 信号・veto 信号を制御することで、取得データ量を減らし、デッドタイムを抑えるようになっている。この他にもイベントごとに時刻付けする機能や、デッドタイムを測定する機能なども実装されている。

FADC Board だけでなく、Digital I/O Board にも PoGOLite 用の機能が実装されている。Digital I/O Board は各 FADC Board からの Trigger 信号および Veto 信号を集め、それらのヒットパターンからコンプトン散乱や光電吸収を起こした有効なイベントなのか、バックグラウンドイベントなのかを判断し、波形を保存すべき PDC の FADC Board に波形保存の Trigger 信号を返す。これにより、必要最低限の波形だけを保存することで、データ量をさらに削減することができる。

本研究では、これらの機能を実装した FADC Board、DIO Board、SpaceCube を用いたフライトモデルの読み出しシステムおよび、フライトモデルの検出機器を使用して、PoGOLite プロトタイプの実証試験に臨んだ。そのため、本研究は、PoGOLite の検出器と読み出しシステム双方の実証試験となっている。

第4章 KEKビームの偏光度測定試験

この章では KEK の PF BL14-A のビームの偏光度測定試験について述べる。我々は PoGOLite のプロトタイプ検出器を製作し、その性能評価を行うに当たって、KEK (高エネルギー加速器研究機構) の PF (Photon Factory) のビームライン BL14-A を用いている。検出器の性能評価を正しく行うためには、あらかじめ性能評価に用いるビームの情報や検出器の特性などを正確に理解しておく必要がある。PF BL14-A のビームの偏光度は過去に約 85 % と測られているが、その後このビームラインは一度改善が行われており、それ以降の偏光度は測定されていない。この試験は、性能評価に用いた KEK の PF14-A におけるビームの偏光度を実測することを目的とする。そこで、PoGOLite 検出器よりもデータ取得の効率は劣るが、より不定性が少なく偏光度を測定できる簡易的な偏光計をデザイン・製作し、実際に KEK のビームライン BL-14A に持ち込むことで、ビームの偏光度を測定した。ここでは、この試験の一連の流れ及び解析について述べていく。

4.1 キャリブレーション用偏光計とその製作

4.1.1 キャリブレーション用偏光計

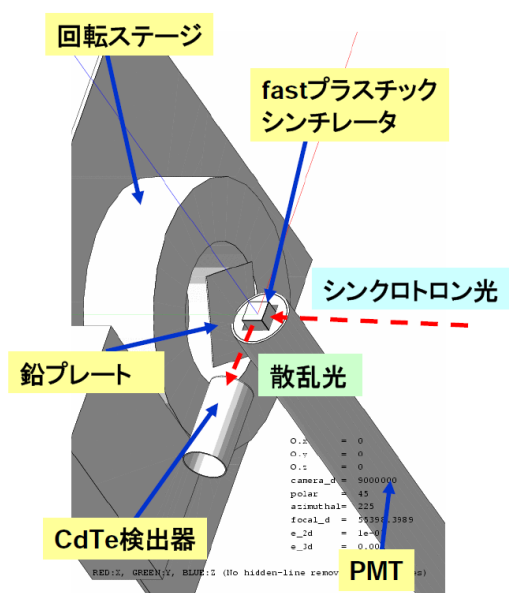


図 4.1: シミュレーションによりデザインした偏光計

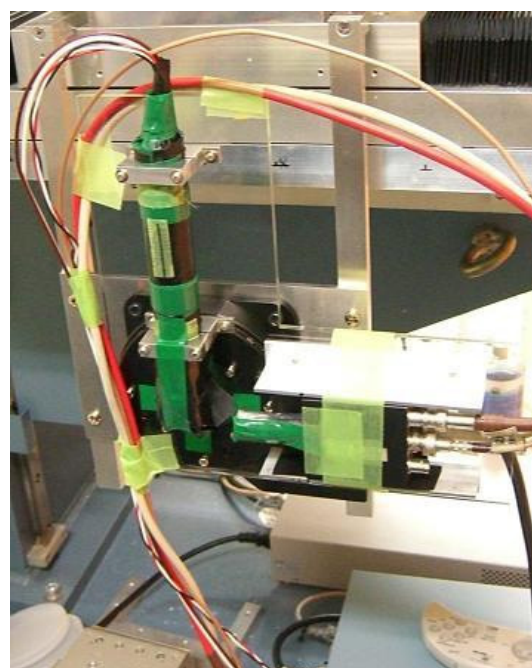


図 4.2: シミュレーションによるデザインに基づいて製作した偏光計

上述のように、KEK ビームの偏光度を正確に測定するため、PoGOLite よりも単純なジオメトリをしたキャリブレーション用の回転式偏光計 (以下、簡易偏光計) をデザイン・

製作した(図 4.1)。この簡易偏光計は 2005 年度に行った KEK 試験で用いられた回転式偏光計の改良版であり、偏光の異方性を測定するために、散乱体には PoGOLite 検出器の主検出部にも用いられている時定数の短いプラスチックシンチレータ (fast プラスチックシンチレータ)、吸収体には CdTe 検出器が用いられている。この簡易偏光計では散乱体に偏光を照射し、そこで起こるコンプトン散乱の異方性を吸収体で捉えることで、偏光を測定する。具体的にはまず、散乱体に加速器によって生成された偏光ビームを照射し、そこでコンプトン散乱した散乱光を、ある方位角に置かれた吸収体で捉え、イベント数を数える。ある程度データを取得した後、ステージを回転させることで、吸収体の相対位置(方位角)をずらしていき、また同様に吸収体でのイベント数を調べる。これを繰り返すことで、散乱の異方性(モジュレーションカーブ)を描き、偏光度を測定する。

ビームの偏光度 P は偏光計の性能を表すモジュレーションファクター (MF) によって以下の式で表される。

$$P = \frac{MF}{MF_{100}} \quad (4.1)$$

ここで MF_{100} は偏光度が 100 % である光を測定したときに得られる MF であり、その偏光計固有の値となる。実際に 100 % 偏光している光源を用いてこの値を求めることは難しいため、モンテカルロシミュレーションを用いて、この MF_{100} の値を評価するとともに、偏光度が 100 % に近い光源を用いて実験を行い、その確認を行った。(但し、実験の方は統計誤差が大きい。) この簡易偏光計はこの MF_{100} の値が PoGOLite 検出器に比べ非常に大きく、偏光度の測定での不定性が少ない。そのため、今回のように実験機器のキャリブレーションに用いるのに適していると言える。

4.1.2 簡易偏光計の製作とシミュレーションによる偏光計の評価

簡易偏光計の製作は、シミュレーションにより最適なデザインを決定し、それに基づいて組み上げていく。シミュレーションでは散乱体の形や大きさ、散乱体と吸収体の距離を変化させて、最も効率の良いデザインを決定する。

シミュレーションによるデザインの決定

理論上は無限小の散乱体を用い、散乱体と吸収体との距離が無限遠の時、偏光計として最大の性能を発揮する。しかし、KEK や SPring-8 (Super Photon ring-8 GeV) などの加速器で扱うビームは数 mm 程度の広がりを持っており、散乱体の大きさに下限を与える。また同時に今回の簡易偏光計には散乱体の光の読み出しに PMT が用いられ、その光電面のサイズ以下の散乱体を用いる必要がある。用いた PMT の直径は 1 インチ (およそ 2.5 cm) であり、散乱体のサイズはそれ以下となる。また、散乱体と吸収体の間の距離を離すにつれて、散乱角度が正確になり、偏光の異方性を測定する精度は増すが、その一方でデータの取得効率は悪くなる。今回のようにビームラインを用いる場合、時間が限られるため、ある程度の取得効率が必要となる。これらの制限を踏まえた上で、ある程度効率が良く、不定性のより小さな偏光計になるよう最適なデザインを目指した。

散乱体のサイズは、上述のような条件を満たすよう、1 cm × 1 cm × 1.5 cm の fast プラスチックシンチレータを使用した。PMT は Ni でできた筒状の電磁シールドに包まれており、光電面が電磁シールドの端より 1.0 cm 程度沈んだ場所に位置しているため、ビームの発射方向から見える実質の散乱体のサイズは 1 辺 1 cm × 1 cm × 0.5 cm の直方体であ

る。また、散乱体を PMT に取り付ける際、固定するためプラスチックでできた台を使用した。(図 4.3)。

次に、散乱体と吸収体の距離について述べる。今回の簡易偏光計では回転ステージに一枚のアクリル板を取り付け、その上に散乱体・吸収体を固定する。そのため、回転ステージにかかる負荷や、回転時の動作を考慮することでコンパクトにする必要があり、数 cm 程度以下という制限が加わる。この範囲で、散乱体・吸収体間の距離による偏光計の性能を示す MF_{100} の依存性を調べた(図 4.4)。なお、 MF_{100} の求め方は後の実際のビーム試験での解析方法に準ずる。4 cm 以下の距離になると MF_{100} は下がり始める。そこで不定性が少なく、かつ効率のよい距離として 4.5 cm を採用し、今後のデザインに採用した。

以上のデザインを踏まえてシミュレーションした偏光計が図 4.1 である。プラスチックシンチレータ(散乱体)のサイズは上記のとおり、1 cm×1 cm×1.5 cm であり、CdTe(吸収体)までの距離は 4.5cm となっている。また散乱体の周りにはプラスチックで作られた高さ 1 cm の散乱体固定台がある。その下部には Ni 製の PMT の磁気シールドをシミュレーションに組み込んだ。一方、吸収体は 1.8 mm×1.8 mm×2.0 mm の CdTe 結晶の検出器を置き、その回りには散乱体からの散乱光以外のバックグラウンドイベントを除去するため、厚さ 0.5 mm の鉛プレートで作られた円柱状のカバーで取り囲まれている。このカバーの散乱体側の面には半径 2 mm の穴が空いており、そこから散乱光が入射する。実際の実験で、回転ステージや散乱体を固定するアクリル板にビームが当たった場合、そこでコンプトン散乱が起こり、バックグラウンドイベントとなる。これらをシミュレーションで評価するためにも、アクリル板をプラスチックとして、回転ステージを Al としてシミュレーションした。また散乱体で透過したビームがアクリル板でコンプトン散乱するのを防ぐため、その間に 0.5 mm の鉛プレートを置いており、これもシミュレーションに組み込んだ。

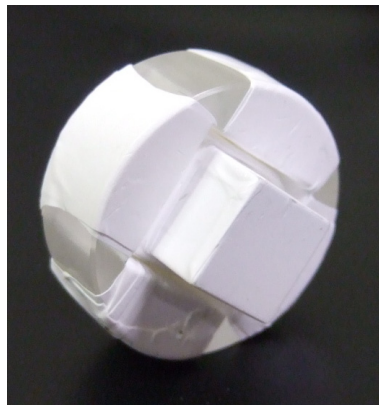


図 4.3: fast プラスチックシンチレータとその固定台

シミュレーションによる簡易偏光計の評価

前述にあるように、偏光計の性能はモジュレーションファクターによって示される。ここではデザインした偏光計が 100 % 偏光しているビームに対し、どのような MF_{100} を示すのかを求める。

実際の偏光計によるビームの偏光度の測定では、ビームの入射方向、およびその偏光方向は一意的であり、散乱の異方性を計るためには、散乱体、吸収体の配置をビームの入射軸を中心に回転させる(図 4.5)。シミュレーションでは、装置を回転させるよりビームの

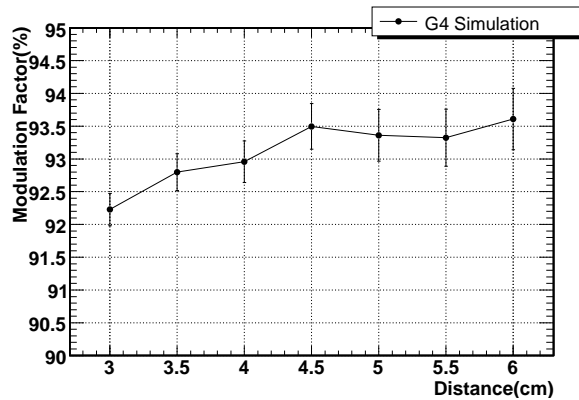


図 4.4: 散乱体・吸収体間の距離による MF_{100} の依存性

偏光ベクトルの向きを変える方が手軽であるため、散乱体に向かって垂直の方向にビームを照射し、ビームの偏光方向の情報のみを回転させることで、散乱の異方性を調べることにした。

今回のシミュレーションでは 0 度から 330 度まで 15 度刻みの 24 角度の偏光方向の情報を与え、各角度において 1 億イベントずつビームを散乱体に入射する。これらのイベントのうち、いくつか散乱体でコンプトン散乱をおこし、かつ吸収体で光電吸収を起こして検出されるのかを調べ、横軸に偏光方向の角度、縦軸にその角度でのカウントをプロットすることでモジュレーションカーブを描き、散乱の異方性を調べる。図 4.6 は 50 keV ビームにおけるシミュレーションによって得られた散乱の異方性を示したモジュレーションカーブであり、三角関数でフィットしてある。

このモジュレーションカーブより、偏光度 100% のビームに対するモジュレーションファクター MF_{100} は

$$MF_{100} = 93.5 \pm 0.3\% \quad (4.2)$$

と求まった。この簡易偏光計の MF_{100} はと PoGoLite の場合 (およそ 27 % [1]) より、はるかに大きく、不定性が小さいと言える。このシミュレーションによるデザインに基づいて簡易偏光計を製作した (図 4.2)。

4.2 簡易偏光計のキャリブレーション試験

前節でデザイン及び製作した簡易偏光計 (図 4.2) を KEK のビームラインに持ち込み、ビームの偏光度測定を実際に行う前に、簡易偏光計が正しく動作するかの確認を行い、同時にシミュレーションで求まった性能 MF_{100} が正しいかをあらかじめ評価しておくことが望ましい。

そこで SPring-8 のビームライン BL 20B2 を用いて、この偏光計の動作確認試験をおこなった。ビームラインのデザインから BL 20B2 のビームの偏光度は 99 % 以上とされており、簡易偏光計の動作確認とキャリブレーションに最適である。本試験は BL 20B2 を用い、簡易偏光計のキャリブレーション試験として、2007 年 6 月 23 日から 29 日にかけて行った。なお、本試験を行った時間は、本来、名古屋大学 U 研 X 線グループの X 線反射鏡実験の試験時間であったが、御厚意により、その空き時間をお借りすることができた。

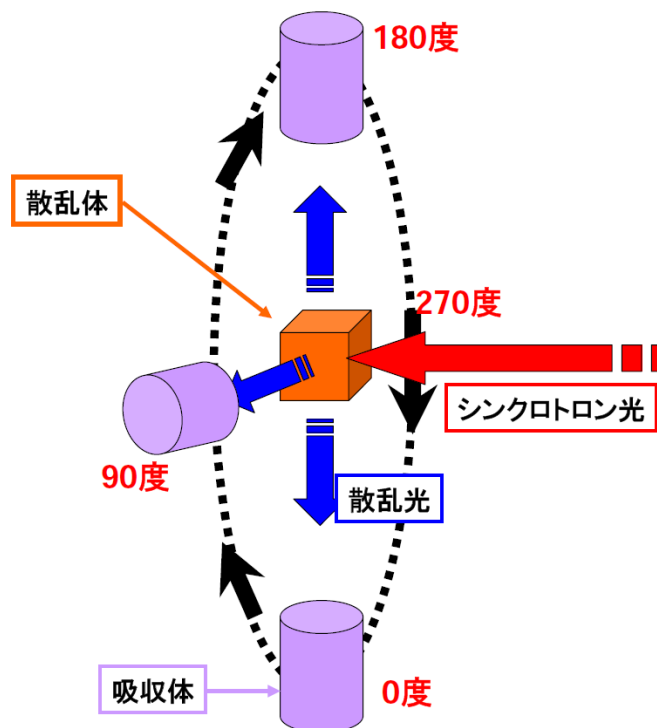


図 4.5: 回転の概念図

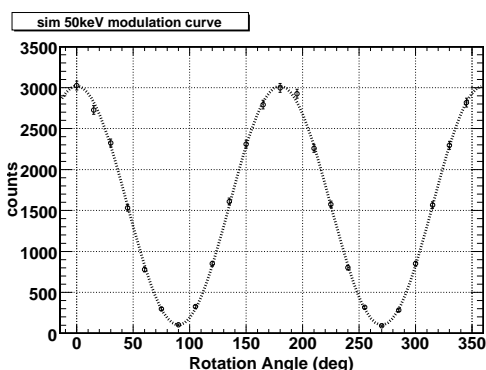


図 4.6: シミュレーションによるモジュレーションカーブ

4.2.1 予備試験

SPring-8 および KEK で実験を行うにあたって、限られた時間を最大限に利用するために簡易偏光計を長時間連続して使用する。簡易偏光計では吸収体として CdTe 検出器を用いるが、この CdTe 検出器にはいくつかのタイプの物が存在する。そこで、どのタイプの検出器が最も適しているかをあらかじめ決定するため、事前に長期稼働試験を行った。

CdTe 検出器の種類は、通常型の物、ショットキー型の物、そしてショットキー型にガードリング電極や冷却器などを備えたショットキー + α 型の物の 3 種類に大きく分けられ、それぞれ特徴を持つ。

通常型の CdTe 検出器は長時間使用し続けてもスペクトルの形を維持し、データ取得を続けることが可能である。しかし、あまり高い電圧をかけることはできず、また低エネルギー側へテイルを引き、分解能がさほど良くないのが欠点である。

一方、電極材料にインジウムを用いることで、リーク電流を低く抑えることのできる

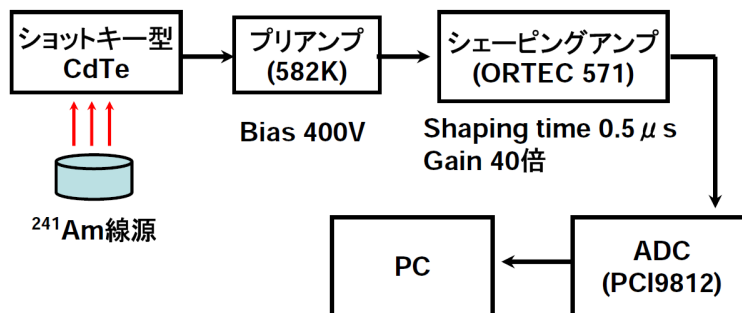


図 4.7: ショットキー型 CdTe 検出器の 24 時間長期稼働試験のセットアップ



図 4.8: ショットキー型 CdTe

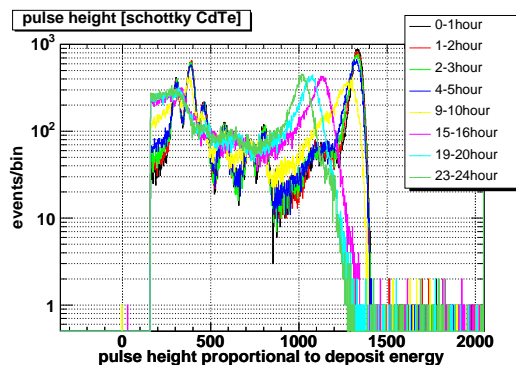


図 4.9: ショットキー型 CdTe によるスペクトル

ショットキー型 CdTe ダイオードと呼ばれる CdTe 検出器は通常型よりも高い電圧をかけることが可能となっており、テイルを引かず、分解能に優れているところが利点である。その一方、長時間使用する場合、ポラリゼーション効果 ([8]、[9]) のため、時間が経つにつれ、スペクトルのピークが低エネルギー側へシフトするようになり、スペクトルの形が崩れてしまうという欠点を併せ持っている。このピークシフトは、電圧を落とし、しばらく経ってから再度電圧をかけて測定すれば元に戻る。

また、ショットキー型にガードリング電極や冷却器などを備えた CdTe 検出器も存在し、従来の CdTe 検出器に比べ、リーク電流やノイズが非常に小さく、分解能にも優れている。

広島大が所持しているショットキー型 CdTe 検出器 (図 4.8) に加え、東京工業大学 (以下、東工大) から通常型 CdTe 検出器 (図 4.11) を借りることができた。この二つの CdTe 検出器のうち、どちらを本試験に使用するのが望ましいのかを調べるため、予備実験として

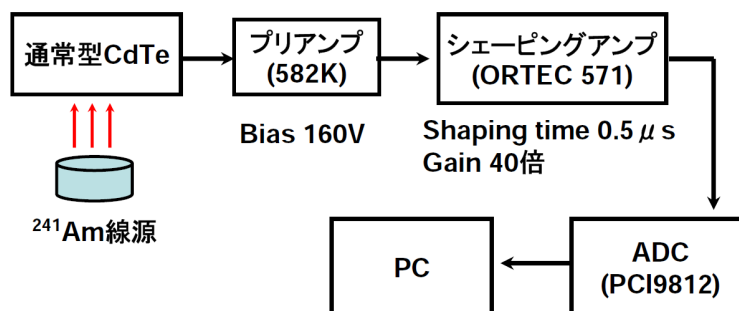


図 4.10: 通常型 CdTe 検出器の 24 時間長期稼働試験のセットアップ



図 4.11: 通常型 CdTe

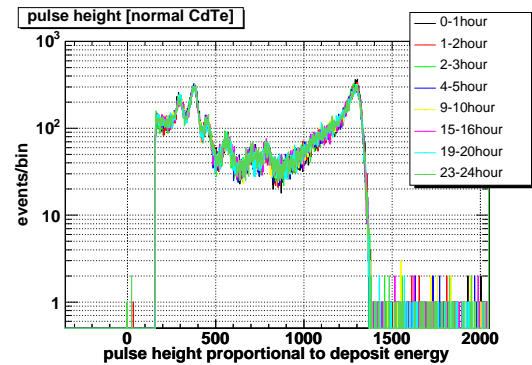


図 4.12: 通常型 CdTe によるスペクトル

24 時間の長期稼働試験を行った。

図 4.7 のようなセットアップを組み上げ、ショットキー型 CdTe 検出器に 400 V のバイアスかけた上で、 ^{241}Am からの 59.5keV の X 線を当て、24 時間スペクトルを取得し続ける。その際、スペクトルのピークが時間とともにどう変化するかを調べる。具体的には、CdTe 検出器にバイアスをかけ始めてから 24 時間連続でデータを取得し、横軸がパルスハイトの一時間毎のヒストグラムを取得した。それぞれのヒストグラムを重ね描いたのが図 4.9 となる。図のように、最初数時間は一定のパルスハイトを出力するが、4~5 時間を越えた辺りから急激にピークチャンネルが低下し始めることがわかった。本実験では偏光度の測定には 2~3 時間と要すると見積られる。しかし、測定前にビームの照射位置を散乱体に合わせる必要があり、その作業に数時間程度の時間の猶予を持つておくことが推奨される。また、その他の予期せぬトラブルなどを考慮すると、5~6 時間以上電圧をかけ続ける可能性があり、4~5 時間の測定で実験を行うことを想定するのは危険である。そのため、ショットキー型の CdTe 検出器は今回の実験では適しているとは言えない。

一方、通常型の CdTe 検出器についても同様の実験を行った。今回の通常型 CdTe 検出器では前述のショットキー型 CdTe 検出器と比べ、高電圧をかけられないため、160 V のバイアスかける (図 4.10)。ショットキー型 CdTe 検出器同様、バイアスをかけ始めてから、24 時間連続でデータを取得し、一時間ごとに得られたスペクトルを重ね描いた (図 4.12)。その結果、通常型 CdTe 検出器はショットキー型 CdTe 検出器と比べ、やはり分解能の面では劣り、テイルを引いてしまうが、24 時間バイアスをかけ続けても一向にスペクトルの形が崩れることは無く、ピークシフトも全く見られなかった。

これらの結果を踏まえ、本試験では通常型 CdTe 検出器をメインに用いることを決定した。また、ショットキー型 CdTe 検出器はバックアップ用として持ち込むこととした。

4.2.2 SPring-8 実験

セットアップとデータ取得

本実験のセットアップを図 4.13 に記す。回転ステージには散乱体である fast プラスチックシンチレータを光学グリースを用いて装着した PMT(光電子増倍管) と吸収体である CdTe 検出器が取り付けられており、回転ステージコントローラを通してノート PC から制御した。これにより、ビームラインの外から遠隔で散乱体を中心に吸収体の配置を回転させ

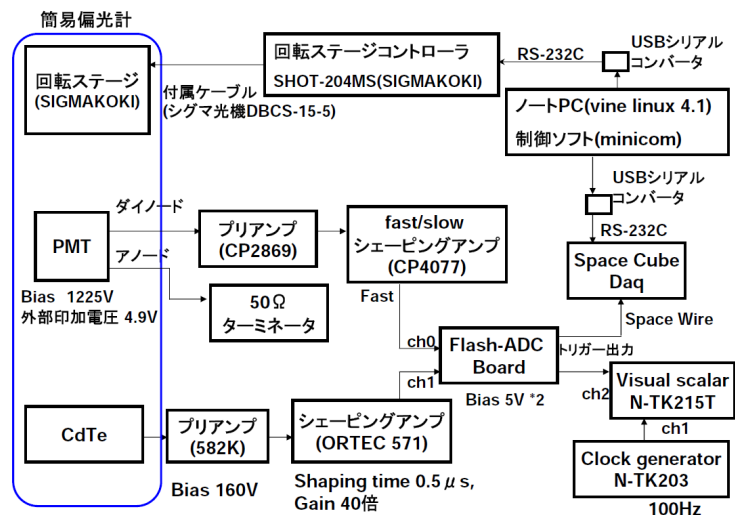


図 4.13: SPring-8 実験のセットアップ

ることができ、ビームを一時停止し、ビームライン内でのセットアップの変更をするという手間を大幅に削減して、入射するビームの散乱の異方性を測ることができる。また PMT にかける電圧及び、CdTe 検出器に接続してあるプリアンプのバイアスは散乱体及び吸収体のスペクトル上での光電吸収のイベントが全て捉えられる様に調節しており、PMT には外部印加電圧として 4.9 V、内部増幅を通して 1225 V のバイアスが、吸収体のプリアンプには予備実験と同様に 160 V のバイアスがかけられている。散乱体に取り付けられた PMT のダイノード信号を高速プリアンプ (CP2869) に通して、その出力を更に fast/slow シェーピングアンプ (CP4077) に通し、fast シェーピング出力を Flash ADC Board の ch0 に入力する。一方、CdTe 検出器の出力信号はプリアンプ (582K) に通し、シェーピングアンプ (ORTEC571) に通し、その出力を Flash ADC Board の ch1 に入力した。Flash ADC Board には Board の動作にデジタル用バイアス、アナログ用バイアスとしてそれぞれ 5 V ずつかけられており、PMT、CdTe 検出器から入ってきたアナログ信号をデジタル変換して読み出す。この読み出しは SpaceCube を通してノート PC から操作する。今回は PMT と CdTe 検出器のどちらかの信号でトリガーがかかった場合、両方のデータを同時に取得する使用となっている。また、この取得システムはこの取得イベント数や各検出器でのスレッシュホールドを予めノート PC から指定する。また、Flash ADC Board からのトリガー出力と clock generator(N-TK203) の信号を Visual scalar(N-TK215T) に入力することで、トリガーレートも測定した。

ここで用いているクリアパルス社製の fast/slow シェーピングアンプは 50 ns という特別に速い時定数を持ち、減衰時定数の速い fast プラスチックシンチレーターの信号を読み出すのに適している。以上のセットアップを用い、2007 年 6 月 26 日 SPring-8 BL 20B2 にて 50 keV ビームの偏光度測定を試みた。散乱の異方性を計るための回転角度は 15 度刻みで 0 度 ~ 180 度の計 13 点である。また、1 角度あたりの取得イベント数は 768000 イベントで、取得時のトリガーレートは 13000 ~ 15000 /s であった。この条件の下、取得した散乱体のスペクトルが図 4.15 である。1500 チャンネル付近のピークは光電吸収イベント、400 チャンネル辺りのスペクトルの不連続点は Flash ADC Board で設定した PMT のスレッシュホールドである。また、それより低チャンネル側にあるものは CdTe 検出器のイベントによってトリガーが立ったときのイベントとなっている。

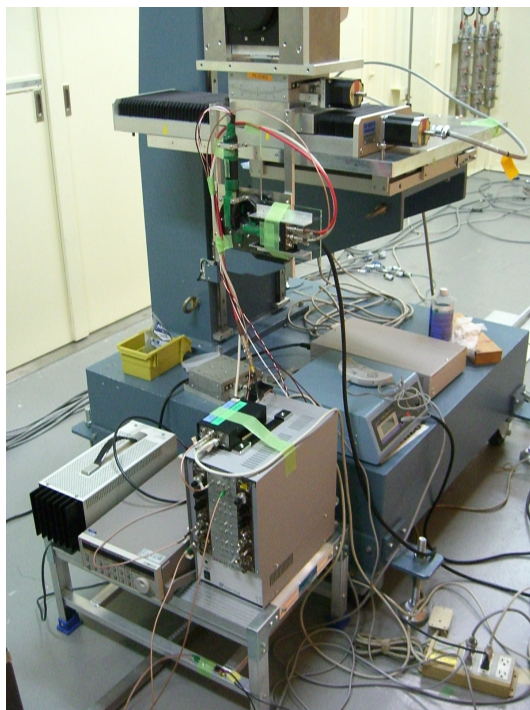


図 4.14: SPring-8 BL20B2 に取り付けられた偏光計

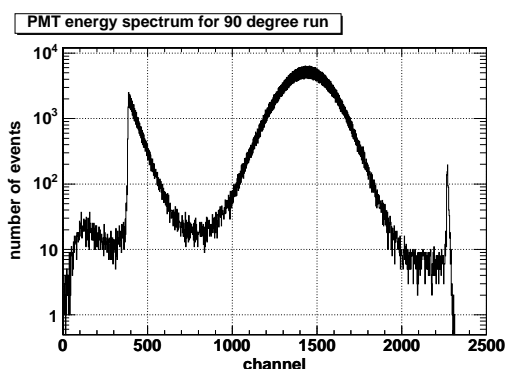


図 4.15: SPring-8 実験で得られた fast プラスチック+PMT のスペクトル

解析方法

今回の簡易偏光計では、入射したビームが散乱体でコンプトン散乱を起こし、そこで散乱した光子が吸収体で光電吸収するイベントを数えることで散乱の異方性を計る。実際には散乱の異方性を視覚的に示すモジュレーションカーブを描くことで、偏光度を測定する。モジュレーションカーブの横軸は、入射ビームが散乱体でコンプトン散乱する方向の角度、つまり吸収体が配置されている方向(図 4.5) となり、縦軸はその時に吸収体によって検出された光電吸収のカウント数となる。

そのため、散乱体で検出される多数のイベントのうちコンプトン散乱を起こしたイベントだけを取り出し、なおかつ、吸収体で光電吸収されるイベントを抜き出すという過程が必要となる。本実験の解析ではこれらのイベントセレクションとして散乱体および吸収体のスペクトルからそれぞれの反応のピーク部分をセレクションするという方法をとる。

図 4.16 は吸収体(通常型の CdTe 検出器)で得られたスペクトルである。約 1600 チャンネル付近に見られるピークが光電吸収によるイベントであり、このピークから高チャネル

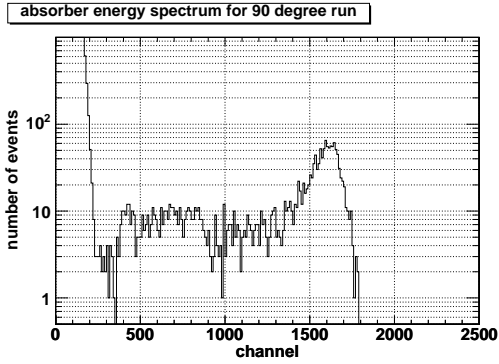


図 4.16: CdTe スペクトル

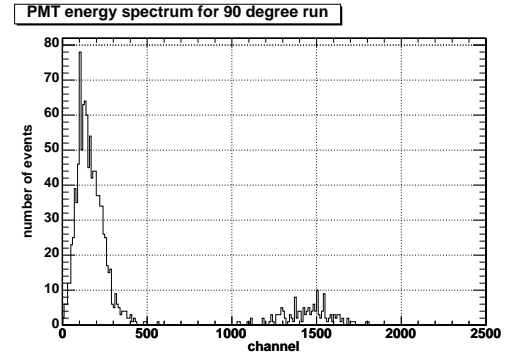


図 4.17: CdTe セレクション後の PMT スペクトル

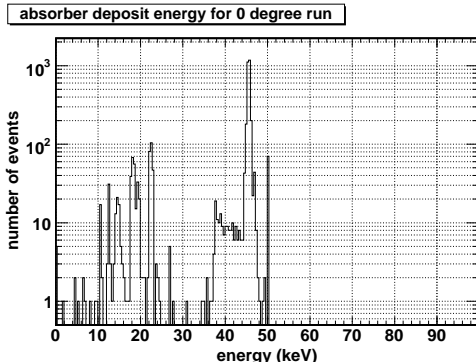


図 4.18: シミュレーションによる CdTe スペクトル

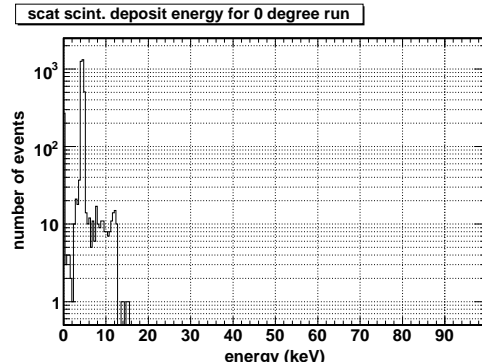


図 4.19: シミュレーションによる CdTe セレクション後の PMT スペクトル

ル側に 10 %、低チャンネル側に 30 %の領域を光電吸収イベントとする。低チャンネル側に多く取ったのは、CdTe 検出器により低エネルギー側にテイルを引く特性部分を取り込むため、またそれと同時に散乱体のなかで二回コンプトン散乱したイベントを取り込む事を考慮したためである。散乱体での二回コンプトン散乱する場合は散乱体でより多くのエネルギーを落とすため、光電吸収イベントでのピークは通常より低チャンネル側に出る。

図 4.17 は吸収体でのスペクトルからイベントセレクションを行った上での散乱体で得られたスペクトルである。1500 チャンネル付近に広がったイベントは吸収体で光電吸収が起こると同時に散乱体でも光電吸収が起こったイベントだと考えられる。これは同時に 2 つのビームイベントが散乱体に入った場合一方がそのまま光電吸収され、一方はコンプトン散乱され、吸収体で光電吸収された場合このようなイベントが検出される。500 チャンネルよりも下に存在するイベントピークが散乱体でのコンプトン散乱イベントにおけるピークである。これらのイベントを散乱体でのコンプトン散乱とするため、このスペクトルからのイベントセレクションは 0 ~ 500 チャンネルとした。これはエネルギーに直すとおよそ 0 ~ 20keV にあたり、散乱体中で二回散乱したイベントも含んでいる。

各角度ごとに、これらのイベントセレクションを全て満たすイベントのカウントを縦軸にとり、プロットする。今回のデータ取得システムでは、散乱体・吸収体のどちらか一方でもイベントがあれば、散乱体・吸収体双方のデータセットを取得する仕様になっており、そのイベント数もそれぞれの角度について、データセット数を 768000 イベントと固定し

ている。そのため、イベント数に応じて縦軸を規格化はしていない。このようにして、プロットされた図 4.20 となり、散乱の異方性が見られるモジュレーションカーブとなる。このプロット点を以下のような三角関数でフィッティングを行う。

$$P[0]\{1 + P[1]\sin[2\pi/180 \times (x + P[2])]\} \quad (4.3)$$

ここで、 $P[0]$ 、 $P[1]$ 、 $P[2]$ はそれぞれ、三角関数での規格化のパラメータ、モジュレーションカーブの振幅の大きさ、位相のずれを表し、これらはフィッティングの際の自由なパラメータである。このうち、 $P[0]$ はイベント数や規格化に自由度を与え、 $P[1]$ は実験で得られるモジュレーションファクター MF を与え、 $P[2]$ はモジュレーションカーブを取る際の回転角のずれを補正する項となる。

シミュレーションについても上述と同様の解析方法を用いる。吸収体で得られたスペクトル (図 4.18) において、およそ 45 keV 付近に見られる光電吸収イベントのピークから低チャンネル側に 30 %、高エネルギー側に 10 % の領域のイベントを光電吸収によるイベントとする。また、このセレクションをかけた後に得られる散乱体でのスペクトル (図 4.19) についても実験データ同様、二回散乱を含む 20 keV 以下の全てのイベントをコンプトン散乱イベントとして扱う。これらのイベントセレクションをクリアするイベントのカウントを縦軸にとり、プロットし、描いたモジュレーションカーブが図 4.6 となる。こちらにも同様に三角関数でフィッティングを行い、モジュレーションファクターを求めたところ $MF_{100} = 93.5 \pm 0.3 \%$ (式 4.2) を得た。

結果

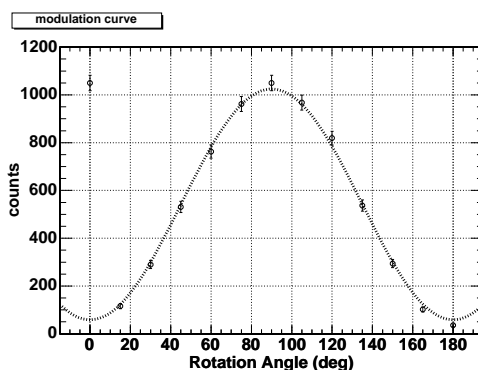


図 4.20: SPring-8 50 keV ビームのモジュレーションカーブ

上記の解析方法を用いてモジュレーションカーブを描いた (図 4.20) ところ、 MF の実験値として、

$$MF = 92.7 \pm 0.7\% \quad (4.4)$$

を得た。これと MF_{100} 、式 4.1 から、この簡易偏光計で測定した SPring-8 のビームの偏光度 P_{SP-8} を求めると、

$$P_{SP-8} = \frac{MF}{MF_{100}} = 99.1 \pm 0.8\% \quad (4.5)$$

となった。

製作した簡易偏光計の MF_{100} は非常に高く、小さな不定性で偏光度を測定できる事が期待された。偏光度が 99 %以上とされる SPring-8 のビームを測定することで、その性能の確認を目指した。結果、偏光度は $99.1 \pm 0.8 \%$ と求まり、コンシステントな結果が得られ、この偏光計はビームの偏光度を約 1 %の精度で求めることができることが分かった。また、同時にその動作も正常に機能することも確認した。

この簡易偏光計を KEK のビームラインに持ち込み、KEK の偏光度測定に望む。

4.3 KEK ビーム偏光度測定試験

目的

19 ユニットの PoGO Lite プロトタイプのパフォーマンス評価を KEK のビームライン PF BL 14-A を行うにあたり、あらかじめ、KEK のビームの情報を調べておく必要がある。そこで本試験では、セクション 4.1、4.2 において、デザイン・製作、キャリブレーションを行った簡易偏光計を実際に KEK の PF-BL14-A に持ち込み、KEK の偏光度を測定することを目的とする。

セットアップとデータ取得

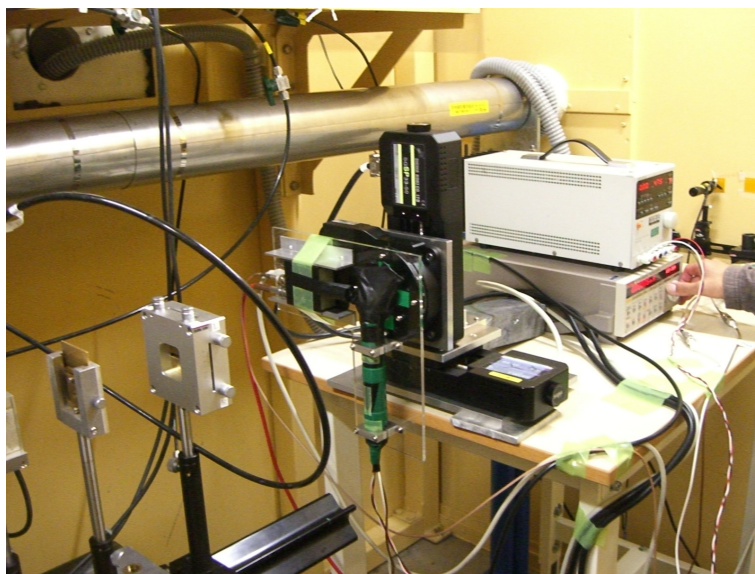


図 4.21: KEK PF BL14-A に取り付けられた簡易偏光計

今回のセットアップは前回の SPring-8 の試験とほぼ同様であるが、偏光計の仕様について一部変更点が挙げられる。前回の SPring-8 試験時は、偏光計自身に取り付けられているステージは回転ステージのみであったが、今回はそれに加えて更に二つのステージが搭載されている。SPring-8 のビームラインにはビーム軸の照準に照射対象物を合わせられるよう、実験室にステージが備え付けられている。このステージはビーム軸に対して上下左右に自由に動かす事が可能で、前回の実験では、これを用いることでビームの照射位置を散乱体の中心に合わせることができた。しかし、KEK のビームラインにはこのようなステージが無いので、今回の KEK ビームの偏光度測定に用いる簡易偏光計にはあらか

じめ左右横方向に動くステージ (以下、X ステージ)、上下縦方向に動くステージ (以下、Z ステージ) が加えられており (図 4.21)、これらをビームの照射位置を散乱体に合わせるのに用いた。

KEK でのセットアップは SPring-8 での測定試験とほぼ同じセットアップ (図 4.13) が用いられるが、PMT の外部印加電圧のみ 4.75 V に変更した。

偏光計の回転ステージには散乱体である fast プラスチックシンチレータを装着した PMT と吸収体である通常型 CdTe 検出器が接続されたプリアンプ (582K) が取り付けられている。上述のように、PMT にかげられた外部印加電圧は 4.75 V であり、内部増幅により 1187.5 V のバイアスがかけられている。この変更は試験前に ^{241}Am の線源からの 59.5 keV の X 線を散乱体に照射し、スペクトルを確認することで、試験で取得する 70 keV までのビームの光電吸収イベントが全て得られるように調節したためである。一方、通常型 CdTe に取り付けられたプリアンプには前回同様、バイアスとして 160 V がかけられている。

以下は SPring-8 実験時と同様、PMT のダイノード出力を高速プリアンプ (CP2869) に通し、その出力信号を fast/slow シェーピングアンプ (CP4077) に入力し、fast シェーピング出力を Flash ADC Board の入力端子 ch0 に入力した。また、吸収体を取り付けたプリアンプの出力をシェーピングアンプ (ORTEC571) に通し、その出力を Flash ADC Board の入力端子 ch1 に入力した。

今回も吸収体・散乱体のどちらかの信号でトリガーがかかった場合、両方の信号を同時に取得する。

以上のセットアップを用いて、2007 年 11 月 13 日～17 日、KEK PF-BL14 A にて 25 keV、50 keV、70 keV のエネルギーのビームの偏光度測定を行った。それぞれのエネルギーに対し、測定は複数回行っており、散乱の異方性を計るための回転角度は 0 度～270 度、その間隔は 15 度刻みの計 19 点、あるいは 45 度刻みの計 7 点の二通りである。また、1 つの角度あたりに取得したデータ数は SPring-8 実験時と同様 768000 イベントであり、典型的な取得にかかった時間はおよそ 4 分 50 秒である。ビームの照射レートが高い場合、データ取得効率が、データ処理効率を越えて、うまくデータ取得できなくなるため、ビームレートを落とすためにビームの照射点と散乱体の間に厚さ 0～300 μm のタングステンで作られた Filter をはさんで取得した。また、本試験ではデータ取得システムがやや不安定であったため、ビームの照射レートを変え、数回に分けて取得した。今回取得したデータの一覧の詳細は以下にまとめた (表 4.1)。

表 4.1: KEK ビーム偏光度測定時に取得したデータ

No	Energy	タングステンフィルター	Beam Rate	回転角度/測定点数
1	25 keV	0 μm	~22 kHz	15 度刻 / 19 点
2	25 keV	0 μm	~22 kHz	15 度刻 / 19 点
3	25 keV	50 μm	~4 kHz	45 度刻 / 7 点
4	25 keV	50 μm	~4 kHz	45 度刻 / 7 点
5	50 keV	200 μm	~14 kHz	15 度刻 / 19 点
6	50 keV	200 μm	~18 kHz	45 度刻 / 7 点
7	50 keV	300 μm	~5 kHz	15 度刻 / 19 点
8	70 keV	75 μm	~10 kHz	15 度刻 / 19 点
9	70 keV	100 μm	~5 kHz	45 度刻 / 7 点

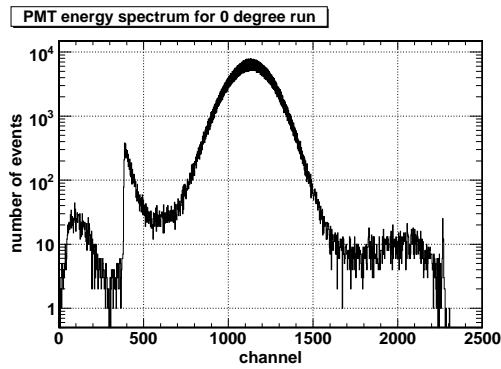


図 4.22: KEK 偏光度測定時に得られた散乱体でのスペクトル

図 4.22 は 2007 年 11 月 13 日に 50 keV ビームの偏光度を測定した際の散乱体でのエネルギースペクトルである。そのスペクトルの形状は Spring-8 時同様であり、1100 チャンネル付近に見られるのが光電吸収によるピークである。また、400 チャンネル付近に見られるスペクトルの不連続点は Flash ADC Board によって制限をかけた PMT のトリガースレッシュホールドにあたる。それより以下のチャンネルで見られるイベントは吸収体である CdTe 検出器によってトリガーが立った際に、散乱体が落としていたイベントとなる。

解析方法

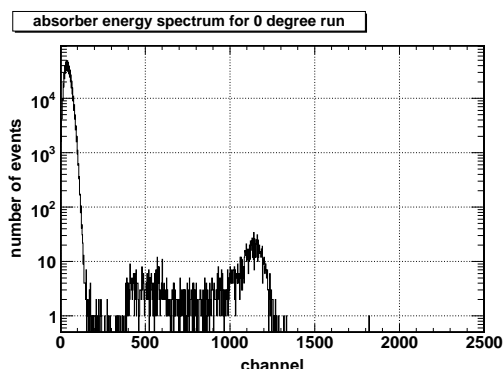


図 4.23: KEK 偏光度測定時における CdTe スペクトル

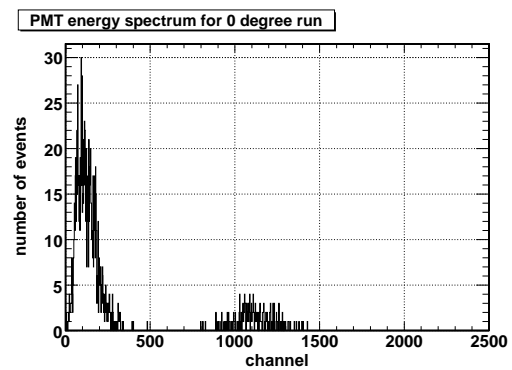


図 4.24: KEK 偏光度測定時における CdTe セレクション後の PMT スペクトル

解析方法は SPring-8 の実験時のものに準ずる。エネルギースペクトルからのイベントセレクションによって、散乱体でコンプトン散乱を起こし、その散乱光が吸収体で光電吸収されるイベント数をカウントし、それを元にモジュレーションカーブを描く。そこから求まるモジュレーションファクター MF をシミュレーションにより求めた MF_{100} と比較することで、偏光度を求める。SPring-8 試験時に行ったシミュレーションと比較をするため、イベントセレクションも SPring-8 同様の方法をとった。

図 4.23 は、50 keV ビームを測定した際に吸収体 (CdTe 検出器) によって得られたスペクトルである。図の 1100 チャンネル付近のピークが光電吸収によるイベントである。ピー

クから高エネルギー側に 10 %、低エネルギー側に 30 %の領域をセレクション領域とし、含まれるイベントを全て光電吸収のイベントとして扱う。

上記のセレクションを満たした上で、得られる散乱体のスペクトルが図 4.24 である。100 チャンネル辺りに見られるピークがコンプトン散乱によるものであり、高エネルギー側に広がっているのは散乱体の中で二回コンプトン散乱を起こしたイベントによるピークが重なっているためである。また、1200 チャンネルあたりに存在するイベントは SPring-8 時のスペクトルにも見られた散乱体で光電吸収が起こると同時に、吸収体でも光電吸収が起こるイベントである。SPring-8 時と同じく、散乱体中でコンプトン散乱を行ったイベントとして 0 ~ 350 チャンネルまでの領域に含まれるイベントをセレクションした。

これらのセレクションを満たすイベントの数を散乱体で光電吸収したイベント数で規格化したものを縦軸に、横軸に測定時の角度をとり、プロットしたものが図 4.25 のモジュレーションカーブに当たる。

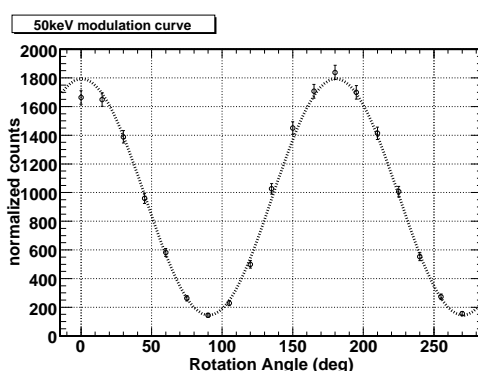


図 4.25: 得られた KEK50keV ビームのモジュレーションカーブ

結果

式 4.3 によってモジュレーションカーブ (図 4.25) をフィッティングしたところ、50 keV の MF の実験値として、

$$MF = 85.1 \pm 0.8\% \quad (4.6)$$

を得た。

その他の取得したデータによる解析結果は表 4.2 に記載している。また、図 4.26、4.27 は 25 keV、70 keV のモジュレーションカーブである。これらの結果をエネルギーごとに重み付き平均をとり、その値をそのエネルギーのビームでの MF とする。

また、100 %偏光に対するモジュレーションファクター MF_{100} は、前回同様、シミュレーションから求める。50 keV のビームに対してのシミュレーションについては SPring-8 時のもの (図 4.6、式 4.2) を用いる。その他、25 keV、70 keV についても同様にシミュレーションからもとめた

実験値とシミュレーションによって求めた値から、各エネルギーの KEK の偏光度として、

$$P_{\text{KEK-70keV}} = 89.4 \pm 0.7\% \quad (4.7)$$

$$P_{\text{KEK-50keV}} = 89.7 \pm 0.6\% \quad (4.8)$$

$$P_{\text{KEK-25keV}} = 88.5 \pm 1.0\% \quad (4.9)$$

が得られた。結果のまとめを表 4.3 に記した。

表 4.2: 各データから得られたモジュレーションファクター

No	Energy	モジュレーションファクター
1	25 keV	$85.0 \pm 1.3 \%$
2	25 keV	$80.7 \pm 1.5 \%$
3	25 keV	$85.2 \pm 2.4 \%$
4	25 keV	$84.7 \pm 2.5 \%$
5	50 keV	$85.1 \pm 0.8 \%$
6	50 keV	$83.3 \pm 1.1 \%$
7	50 keV	$83.1 \pm 0.8 \%$
8	70 keV	$84.1 \pm 0.6 \%$
9	70 keV	$82.5 \pm 0.8 \%$

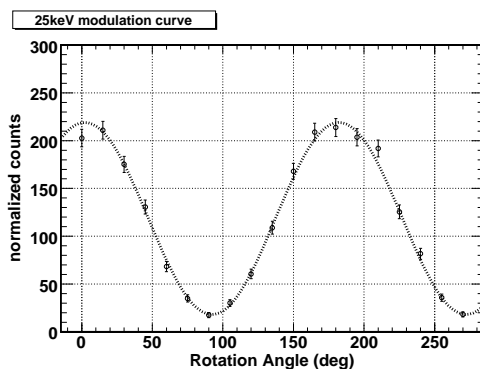


図 4.26: KEK25 keV ビームのモジュレーションカーブ

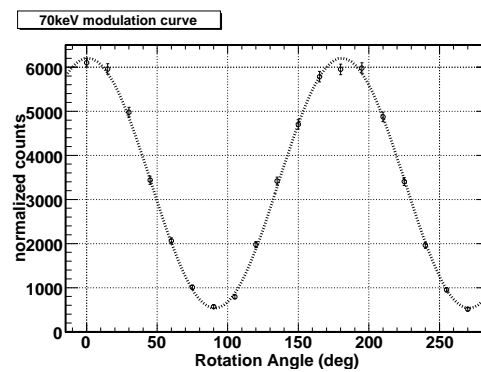


図 4.27: KEK70 keV ビームのモジュレーションカーブ

表 4.3: KEK ビーム偏光度の測定結果

Energy	MF	MF_{100}	偏光度
25 keV	$85.0 \pm 1.3 \%$	$94.5 \pm 0.3 \%$	$88.5 \pm 1.0 \%$
50 keV	$83.3 \pm 1.1 \%$	$93.5 \pm 0.3 \%$	$89.7 \pm 0.6 \%$
70 keV	$82.5 \pm 0.8 \%$	$93.4 \pm 0.4 \%$	$89.4 \pm 0.7 \%$

本試験は、自らデザイン・製作を行った簡易偏光計を用いることで、PoGOLite プロトタイプのカリブレーションに用いる BL14-A のビームの偏光度を小さな不定性で求めることを目指した。その結果、ビームの偏光度はおよそ 88 ~ 90 % だと求めた (表 4.3)。この結果を PoGOLite プロトタイプのカリブレーション試験に用いることとする。

第5章 fastプラスチックシンチレータの特性試験

本章では、PoGOLite 検出器の PDC ユニットの主検出部に用いられている fast プラスチックシンチレータの特性試験について述べる。本研究における主検出部の性能実証試験だけでなく、PoGOLite 検出器による観測で得られるデータの解析にはシミュレーションにより作成した応答関数が用いられる。

理想的な検出器の場合、ある単色のエネルギーを持つ X 線が入射したとき、その応答としてある一定の値のパルスハイトのみを出力する。しかし、実際には単色の X 線が入射した場合でも、検出器の形状や特性など様々な要因のため出力されるパルスハイトは検出器固有の確率分布に従った分布をとる。このような検出器固有のパルスハイトの確率分布を検出器のエネルギー応答と呼ぶ。応答関数はこのエネルギー応答や、検出器の有効面積など、検出器固有の特性により決まり、検出器に入射する X 線のエネルギーに対し、検出器によってどのようなパルスハイトスペクトルが出力されるかを表す [10]。この応答関数を求めるため、これまでも slow プラスチックシンチレータ・fast プラスチックシンチレータの特性試験が行われてきた [6]。

本章では実機の構成で fast プラスチックシンチレータの特性を求めるため、PDC ユニットとして slow プラスチックシンチレータ、BGO とともに組み上げられたものについての特性を測る。具体的には単色のエネルギーを持つ X 線に対する光量とエネルギー分解能、及び集光率の位置依存性を調べた。このうち、エネルギー応答の試験は、前章のビーム偏光度測定と並行して行われた。以下ではこれらの試験と結果について述べていく。

5.1 エネルギー応答の非線型性

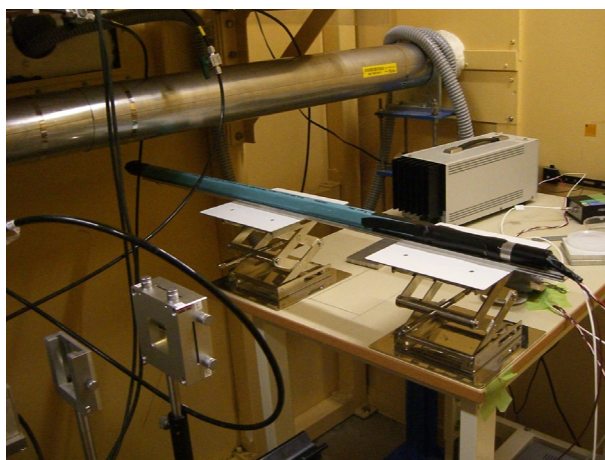


図 5.1: KEK での実験の様子

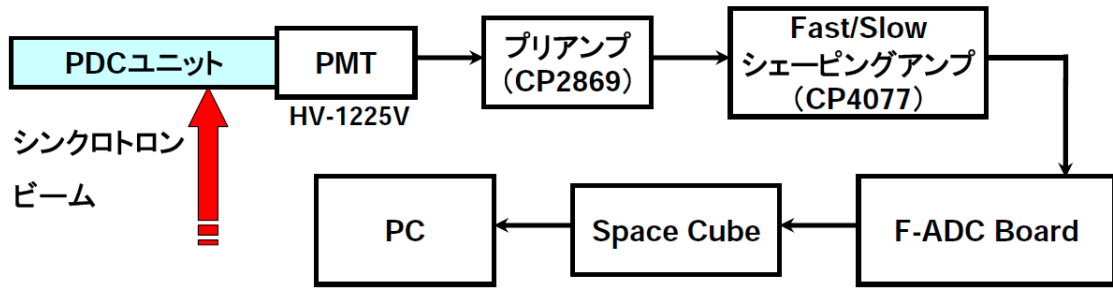


図 5.2: エネルギー応答の非線型性測定のセットアップ

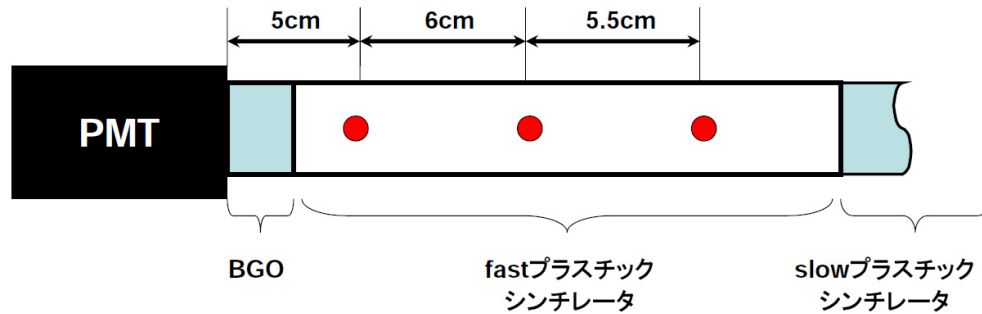


図 5.3: シンクロトロンビームの照射位置

fast プラスチックシンチレータの特性の一つとして、照射するエネルギーに対する非線型性が挙げられる。これは、照射した X 線のエネルギーに対し、fast プラスチックシンチレータの光量が比例しないという特性を指す。この特性は特に 20 keV 以下のエネルギー帯域において比例関係に折れ曲がりが見られる。これはクエンチング効果 (消光効果) により、励起分子が発光を伴わず、そのエネルギーを主に熱によって失ってしまうことに由来している [11][12]。

PoGOLite による検出帯域は 25 ~ 80 keV をターゲットとしており、これらのエネルギーを持った X 線偏光が検出器に入射し、進行方向に対し 90 度方向にコンプトン散乱される場合、2 ~ 11 keV 程度のエネルギーが散乱の生じたユニットで検出され、エネルギーから反応があったことを知る。このため、20 keV 以下という低エネルギー側でのエネルギー応答は非常に重要となってくる。

セットアップとデータ取得

本試験は KEK PF BL14-A のシンクロトロンビームを用いて、エネルギー応答を確認する。図 5.2 のように、1 ユニットの PDC の主検出部である fast プラスチックシンチレータの部分に 8 ~ 75 keV のエネルギーを持つビームを照射する。PDC は PMT に光学グリースを用いて取り付けられており、PMT のダイノード出力を高速プリアンプ (CP2869) に入力し、その出力を fast/slow シェーピングアンプ (CP4077) に入力し、更にその出力信号を F-ADC Board の入力端子 ch0 に入力し、Space Cube 経由でデータ取得に臨む。なお、F-ADC によるデータ取得システムは 4 章で述べた KEK 偏光度測定時と同様であり、イベント数を指定してデータを取得する事ができる。データ取得システムがやや不安定で

多くのデータ収集を一度に行うことができなかつたため、各エネルギーにおいて、ビームレートを変えて数回データを取得することにし、それぞれ 256000 イベントずつとした。ビームを照射する際は、他の光が入らないようブラックシートを PDC 及び PMT に完全に被せた。

エネルギー応答の非線型性は上述のセットアップを用いて得られたデータから各エネルギーでのエネルギースペクトルを作成し、ビームのエネルギーが 40 keV 以下ではポアソン関数でフィット、40 keV 以上ではガウシアンでフィッティングにより光電吸収ピークを決定し、そのチャンネル数と、照射したエネルギーの関係を求める。しかし、KEK PF BL14-A ではその照射するビームのエネルギー帯域によって照射スポットが異なる (図 5.3、表 5.1)。図 5.3 の赤い丸が照射位置、長さは PMT の磁気シールドから照射点までの長さを記してある。これにより、後に述べる、集光率の位置依存性が影響を与える。そのため、あらかじめビームの照射スポットの違いによる依存性を求める必要がある。

表 5.1: エネルギー帯域とビーム照射スポット

ビームエネルギー	ビーム照射点 (PMT の磁気シールドとの境目からの距離)
8 keV - 15 keV	5 cm
16 keV - 19 keV	11 cm
25 keV - 75 keV	16.5 cm

そこでまず 14keV のビームを用い、3つの照射位置での相対光量を求め、その結果を用いて補正を行った上でエネルギーの応答の非線型性を求めた。

結果

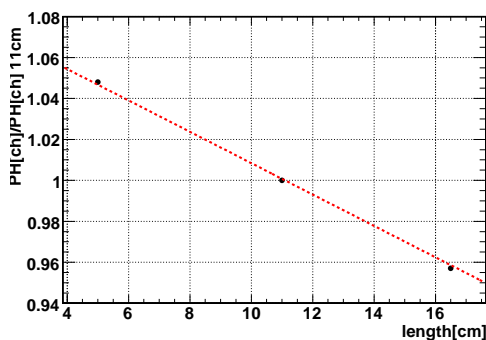


図 5.4: 光量の各スポットの位置による依存性

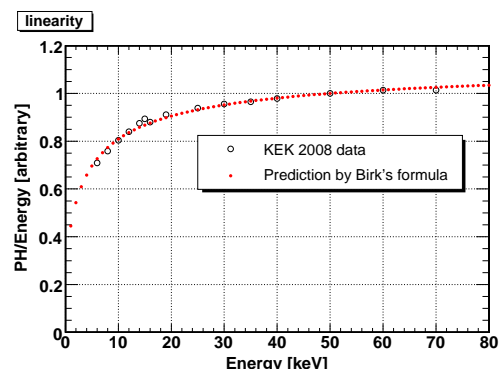


図 5.5: エネルギー応答の非線型性

3つの照射位置での相対光量を求めた結果が図 5.4、この補正を加え、エネルギー応答の非線型性を求めた結果が図 5.5 である。図 5.5 では 50 keV の値で規格化してある。20 keV 以下のエネルギーでエネルギー応答が大きく下がっている事がわかる。(なお、図 5.5 において、50 keV 以上のデータは、40 keV 以下と異なる高圧値で取得されているが、これは 40 keV の点で両方の高圧値でデータを取得しているため、ここでスケールをそろえてプロットしてある)

この結果はクエンチング効果によるものと考えられる。このクエンチング効果は Birk's の経験式として以下の式のように表される [11]。

$$\frac{dL}{dx} = \frac{S \frac{dE}{dx}}{1 + kB \frac{dE}{dx}} \quad (5.1)$$

ここで dL/dx は荷電粒子が通過する単位長さあたりに放出される光量、 dE/dx は荷電粒子が通過する単位長さあたりのイオン化によって失うエネルギーである。また、 S はクエンチング効果がない際のシンチレーション光量を表す。 kB は Birk's パラメータと呼ばれ、クエンチング効果の度合を示す。

dE/dx の理論式として文献 [13] に与えられている表式を採用し、パラメータ kB を何通りか変えて、図 5.5 と式 5.1 を比べた結果、 $kB = 0.008 \text{ cm/MeV}$ で実験データを良く再現できた。これを図 5.5 の赤線として示す。

また同時に、エネルギー分解能のエネルギー依存性を求めた。エネルギー分解能は主に光電面から出る電子の数のポアソン統計で決まると考えられるが、PDC ユニット内部の集光率や、PMT の量子効率の非一様性などのため、純粋なポアソン統計からずれる可能性があり、実機を用いた測定が必要である。すでに述べたように、図 5.5 のデータのうち 50 keV 以上は異なる高圧値で取得されているので、分解能の評価は 40 keV 以下のみで行う。ポアソン関数でフィットして分解能を $2.35/\sqrt{\mu}$ (μ はポアソン関数の平均値) であらわしたものを図 5.6 としてまとめる。横軸は one-photon のピークとの比であらわしてある。これをべき関数と比べた結果、純粋なポアソン統計の場合 (実線) よりも分解能が悪く、1.19 倍にスケールした場合 (点線) でよく記述できることが分かった。

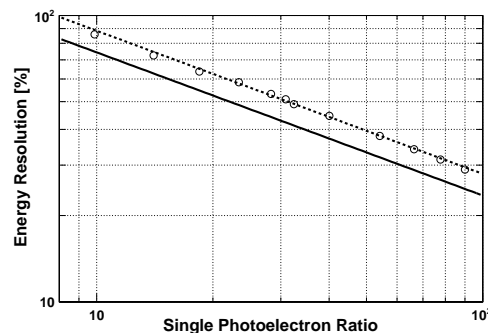


図 5.6: エネルギー分解能のエネルギー依存性

これらの結果をシミュレーションに組み込み、6章の PoGOLite プロトタイプの実証試験の評価に用いる。具体的には、エネルギーデポジション、非一様性、集光率を考慮して光電子数の期待値を求め、ポアソン統計に従って離散的な光子数のスペクトルを生成する。さらに PMT の分解能を取り込むためこの離散的な分布の各ピークをガウス関数で揺らがせる。この際に、本実験で求めた分解能の実測を再現するようにガウス関数のパラメータ (分散) を定めた。詳しい手順は、[11] にゆずる。

5.2 集光率の位置依存性

本節では PoGOLite の主検出部である fast プラスチックシンチレータの集光率の位置依存性について述べる。PoGOLite の検出部である PDC ユニットの大部分を占める slow プ

ラスチックシンチレータ、fast プラスチックシンチレータの長さはそれぞれ 60 cm、20 cm と長い構造になっている為、その先端部と根元では光量に差ができてしまう。これを応答関数に取り込むため、slow プラスチックシンチレータに関しては、既に集光率の位置依存性の測定が行われている [6]。本試験では天体からのエネルギースペクトルおよび偏光を測定する主検出部である fast プラスチックシンチレータについて詳細な集光率の位置依存性を求める。

セットアップとデータ取得

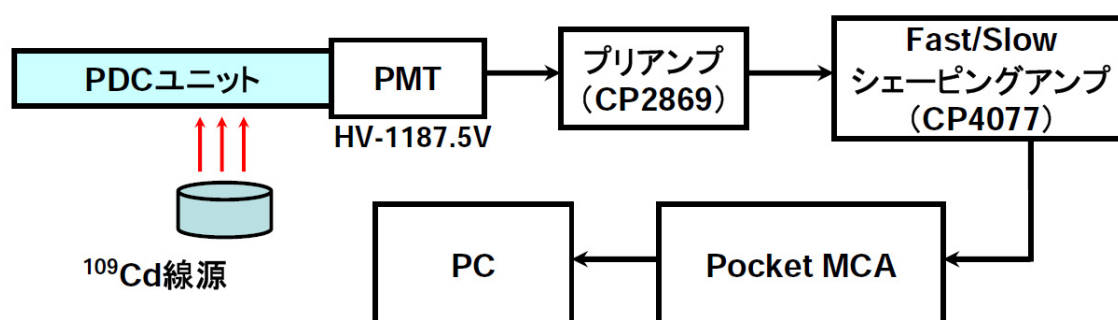


図 5.7: 集光率の位置依存性測定のセットアップ

図 5.7 のように、PMT に PDC ユニートを光学グリースで取り付け、PMT のダイノード信号を高速プリアンプに入力し、その出力信号を fast/slow シェーピングアンプに入力する。その出力信号を今回は PocketMCA に入力し、PC でデータ取得を行う。PDC には側面から、コリメートした ^{109}Cd 線源の 22 keV の X 線を照射し、スペクトルデータを取得する。位置依存性を調べるため、線源を当てる位置を BGO との境目である根元から 2 cm の点と 3 cm の点から 2 cm 間隔に 19 cm までずらしていき、計 10 点でデータ取得を行う。それらのスペクトルピークのチャンネルと測定した位置の関係を求める。なお、スペクトルは ^{109}Cd 線源を当てて測定したのち、バックグラウンド測定を行い、それらを差分したものをガウス関数でフィットした。

結果

実験の結果、得られたスペクトルを図 5.8 に示す。黒が BGO と fast プラスチックシンチレータとの境目から 19 cm、赤が 11 cm、青が 3 cm の位置に Cd 線源を置いた時に得られたスペクトルである。このようにピークの位置が BGO から遠くなるにつれて下がるのがわかる。このスペクトルのピークと位置の関係をプロットしたものが図 5.9 である。横軸が BGO と fast プラスチックシンチレータとの境目からの距離、縦軸は 11 cm の時のピークチャンネルで規格化した値である。先端と根元ではその光量の比は約 13 % 変わり、また根元 3 cm 部分で集光率は一定であった。

この位置依存性の結果は 6 章の性能実証試験の解析で用いる。

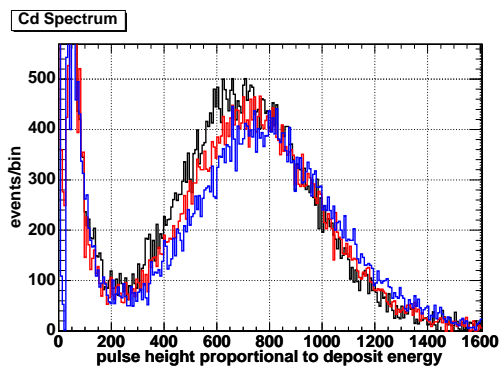


図 5.8: Cd 線源を照射することで得られたスペクトル。BGO との境目からの距離が黒 19 cm、赤 11 cm、青 3 cm

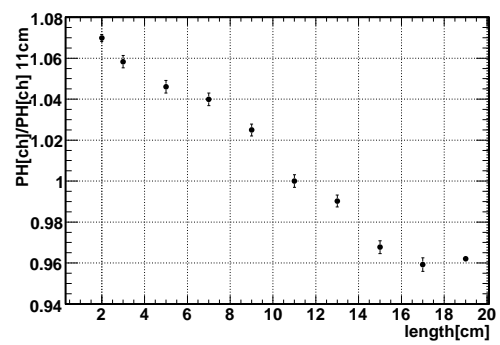


図 5.9: 集光率の位置依存性

第6章 19ユニットプロトタイプの上 試験

6.1 目的

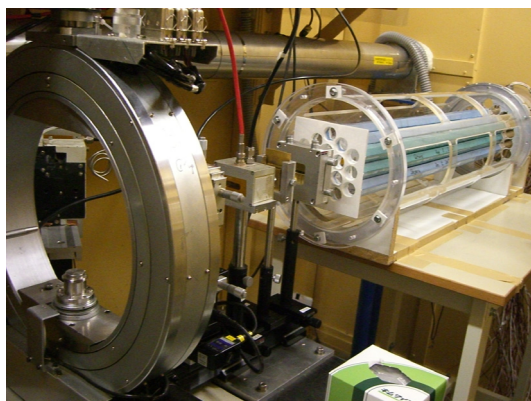


図 6.1: KEK PF BL14-A での実験模様

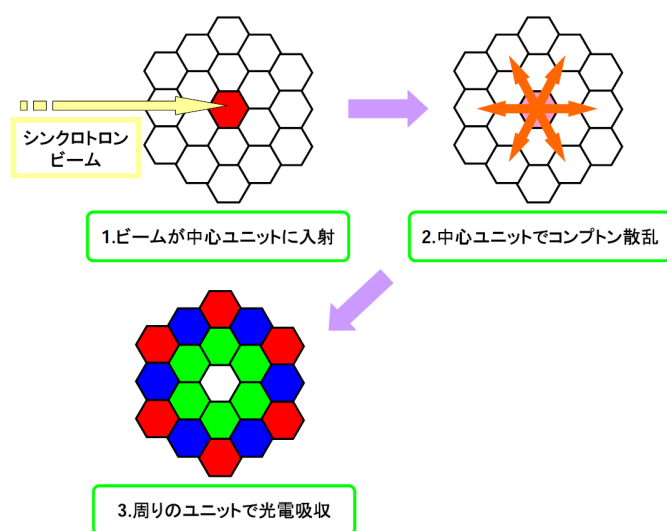


図 6.2: 2ヒットイベントによる散乱の異方性の測定概念

PoGOLite 検出器による観測性能を予想するには、シミュレーションを用いる。また観測データを解析するための装置の応答関数もシミュレーションを用いて作成する。そのシミュレーションへのフィードバックや、PoGOLite 検出器の偏光検出能力を正確に評価すべく、これまで KEK のシンクロトロン放射光を用いて定期的に試験が行われてきた。特に、2007年3月には KEK PF にて PDC7 ユニットからなるプロトタイプ検出器を製作

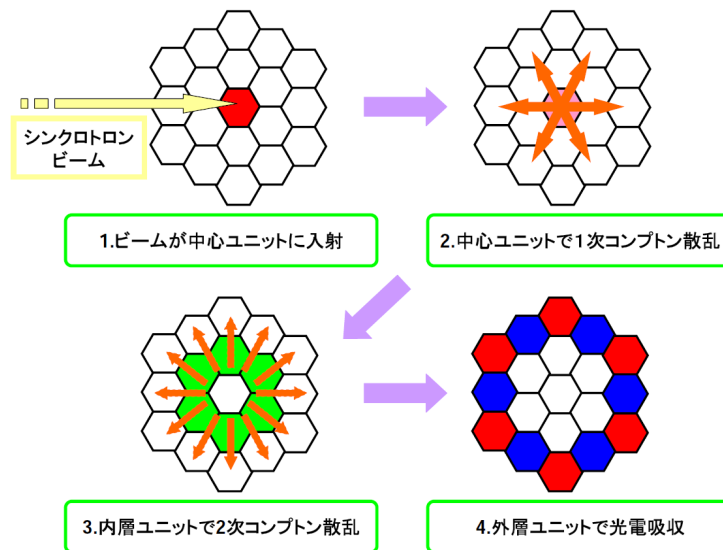


図 6.3: 3 ヒットイベントによる散乱の異方性の測定概念

し、その性能の実証試験が行われている。本試験は更にその7ユニットに外周を1層増やした19ユニットでのプロトタイプ型検出器を製作し、その偏光検出能力の性能実証を行うことを目的とする。19ユニットになることで、散乱の異方性の測定についても、「入射したユニットを中心とした際に、三つの距離で異方性を測る事ができる(図6.2)」、「中心ユニット以外で散乱した際の異方性を測る事ができる(図6.3)」など、PoGO Lite 検出器による本観測とほぼ同等のイベントを扱うことが可能となる。

本実験には、3章で述べたフライトデザインの検出器および読み出し装置が用いられており、また、5章で事前に調べた主検出部の fast プラスチックシンチレーターの光量の非線型性や集光率の位置依存性などの特性を始めとする検出器の応答を事前に取得した上で試験に望んだ。そのため、実機と同等の構成でのキャリブレーション試験となる事が期待される。これらを用いて2008年2月に KEK PF BL14-A のビームラインにて性能実証試験を行った。

本章ではこの性能実証について述べていく。

6.2 ビーム試験のセットアップとデータ取得

セットアップ

本実験のセットアップとユニットのIDを図6.4に記す。蜂の巣状に並べた19ユニットのPDCユニットのうち中心のユニットに垂直に50 keVのビームを照射し、slow プラスチックシンチレータ、fast プラスチックシンチレータ、BGOシンチレータで出される信号を各ユニット1本のPMTでまとめて読み出し、その出力をそれぞれプリアンプに通す。今回19ユニットの信号をFlash-ADC Board(FADC Board)で信号処理を行うが、FADC Board一枚辺りには入力端子は8つしか付いていない。そのため、本試験では三枚のFADC Boardを用いた。それぞれのFADC Boardで読み出した信号をRouter Board、Space Cubeを通し、ノートPCにデータ転送を行っている。

実機と同様に19ユニットのPMTのうち、どれか一つでもトリガーが立てば、全てのユニットの波形データをまとめて読み出すという手法を用いている。そのため、3つの

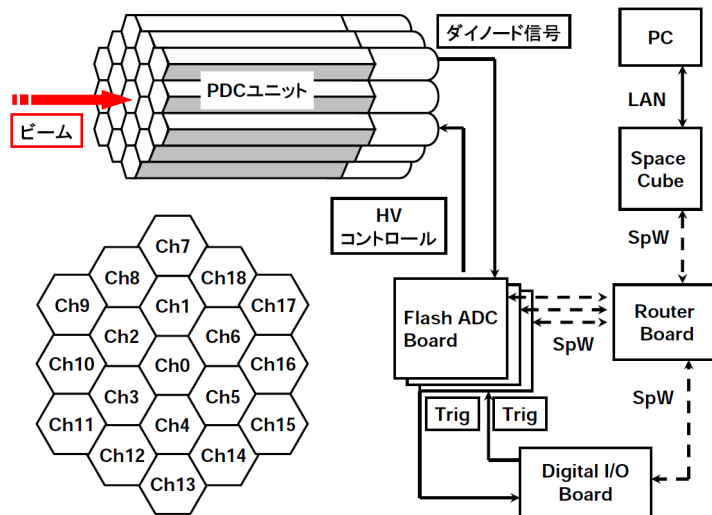


図 6.4: 19 ユニットセットアップの概要および上流から見た各ユニットの配置

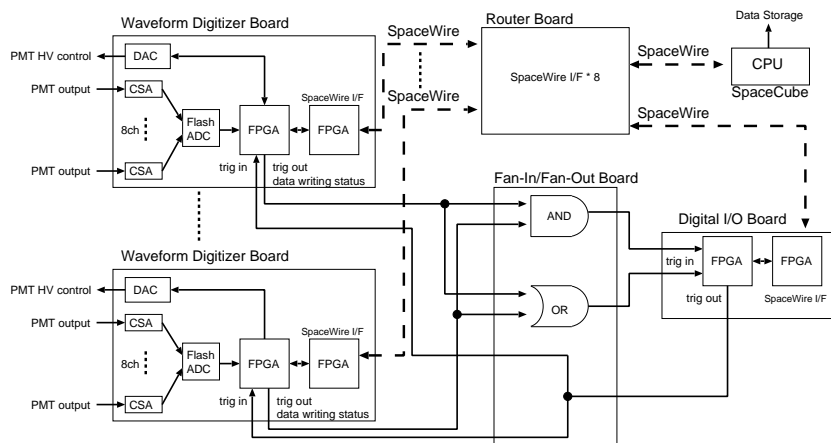


図 6.5: データ取得系のブロックダイアグラム

FADC Board で立つトリガー信号を Fan-In/Fan-Out Board に通し、この中の and/or 回路によって信号処理を行い、Digital I/O Board とやり取りする。この Digital I/O Board もまた Router Board に接続しており、全ての FADC Board から波形データを取得するように指示するという形を取っている。この Digital I/O Board も、Space Cube を通してデータ転送を行うノート PC から and あるいは or などの条件を指定できる。今回は 1 つでもトリガーが立てばデータを読み出すようになっている。

3 章で述べたように、PMT にかける電圧も PC から Space Cube、FADC Board を通して調節できる。19 本の PDC ユニットはそれぞれ光量値が異なるため、PMT にかける高圧 (HV) を調節することでゲインを変え、1photon peak が同じチャンネルになるようにした (表 6.1)。なお、PDC ユニットの ID と位置配置は図 6.4 に記した。

キャリブレーション

前述のように、高圧を調節して PMT のゲインを揃えても、各ユニットの光量 (シンチレータの発光量および集光率) が異なるため、同じエネルギーを落としてもスペクトル上でのチャンネルは異なりうる。そこで、出力信号のチャンネルとエネルギーの対応を知るため、ビームのデータ取得を行う前に、キャリブレーション試験を行った。そのセット

表 6.1: 各ユニットにかけられた HV 値とポアソンフィットにより求めた 1 photon ピークチャンネル

ユニット ID	HV (V)	1photon peak channel (ch)
0	1090	24.1
1	1125	25.1
2	1070	24.1
3	1115	24.2
4	1150	23.2
5	1110	23.9
6	1170	24.7
7	1215	26.2
8	1040	23.8
9	1185	27.3
10	1080	23.3
11	1170	24.3
12	1080	25.3
13	1110	25.2
14	1125	24.5
15	1170	24.6
16	1090	25.1
17	1140	24.1
18	1070	24.6

アップについては、上記の本試験用のセットアップを用いる。中心ユニットのキャリブレーションには照射された 50 keV ビームの光電吸収ピークを、二層目の 6 ユニットについてはそのビームが中心でコンプトン散乱した際の散乱光を光電吸収したピークを、また一番外層に配置されたユニットについては側面から ^{241}Am の 59.5 keV の X 線を照射し、その光電吸収ピークを用いた。それぞれのピークチャンネルに対応するエネルギーは、5 章で求めた fast プラスチックシンチレータの応答を含んだシミュレーションを用いて求める。このシミュレーションによって得られた中心ユニットにおける 50 keV ビームのエネルギースペクトルが図 6.6 である。黒で示されたスペクトルは PMT やプラスチックシンチレータの応答を含まずに作成した生のシミュレーションスペクトルであり、50 keV の鋭いピークが直接入射したビームを光電吸収したイベントを、45 keV 付近のピークは PDC 内で一度散乱された光を光電吸収したイベントを示す。また、赤のスペクトルはシンチレータの応答のみを含んだ物で集光率の位置依存性のため、ピークが低エネルギー側にシフトしている。ここで、シンチレータの根元で 50 keV 全てを光電吸収したものが、横軸 50 keV にくるように規格化した。青で示されたスペクトルは 5 章で求めたエネルギー分解能やポアソン応答を PMT の応答として含んだものである。実際の試験で得られるスペクトルは両方の応答を含んだスペクトルとなるため、青のスペクトルのピーク値をポアソンフィットにより求めた所、43.2keV となった。同様に他のユニットについてもピークのエネルギーを求め、それぞれのユニットのピークチャンネルとエネルギーの対応を表 6.2 にまとめた。それぞれのピーク値が実際に入射したエネルギーより下がるのはシンチレータの応答のためである。また、このキャリブレーションを用いて、50 keV における光量も表 6.2 にまとめた。この光量値は解析を行うに当たって用いるシミュレーションに適応

させる PMT の応答のポアソン揺らぎを正確に求めるために用いられる。これらのキャリブレーションの結果を用いて、後に記載する本試験の解析を進めた。

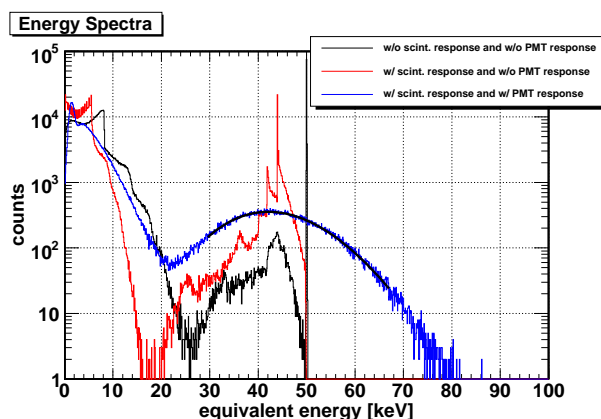


図 6.6: シミュレーションによる 50 keV ビームに対する中心ユニットのスペクトル (黒:生のシミュレーションスペクトル、赤:シンチレータの応答を含んだスペクトル、青:両方の応答を含んだスペクトル)

表 6.2: 各ユニットのキャリブレーションの結果と 50 keV エネルギーに対する光量値

ユニット ID	Channel/keV	50 keV 当たりの光量
0	763.2/43.2 keV	34.3 p.e.
1	707.2/35.7 keV	34.8 p.e.
2	674.7/35.7 keV	35.7 p.e.
3	702.1/35.7 keV	36.3 p.e.
4	695.5/35.7 keV	38.2 p.e.
5	590.1/35.7 keV	31.4 p.e.
6	688.0/35.7 keV	36.2 p.e.
7	860.3/53.2 keV	27.0 p.e.
8	848.6/53.2 keV	30.2 p.e.
9	953.7/53.2 keV	30.7 p.e.
10	875.2/53.2 keV	31.5 p.e.
11	810.2/53.2 keV	29.3 p.e.
12	796.3/53.2 keV	26.9 p.e.
13	905.8/53.2 keV	31.7 p.e.
14	804.8/53.2 keV	28.4 p.e.
15	787.0/53.2 keV	28.0 p.e.
16	758.8/53.2 keV	26.7 p.e.
17	797.0/53.2 keV	27.8 p.e.
18	931.4/53.2 keV	32.7 p.e.

データ取得

上記のセットアップを用いて、2008年2月27日～29日にKEK BL14-Aのビームラインにて実証試験を行った。測定方法としては上述にあるように、19ユニットのうち中心ユニット(図6.4の0ユニット)に50keVビームを照射し、データを取得した。また、検出器を0度から330度まで30度ごとに回転させ、計12角度でデータ取得を行っている。検出器を回転させる際は、一度ビームをストップさせ、実験室の中に入り検出器を回転させた。今回も4章のSPring-8実験、KEK実験同様、イベント数を指定してデータ取得を行うことができ、今回の測定では一度に16万イベントずつデータ取得を行い、各角度でこれを3～4度繰り返しデータを取得した。その際、それぞれのデータ取得にかかった時間を同時に測った。

またバックグラウンドデータを取得するために、ビームを停止した状態で同様にデータを取得した。ビームのデータ、バックグラウンドデータともにライブタイム(データ取得時間)も測定しており、バックグラウンドの差し引きの際に考慮した。

シミュレーション

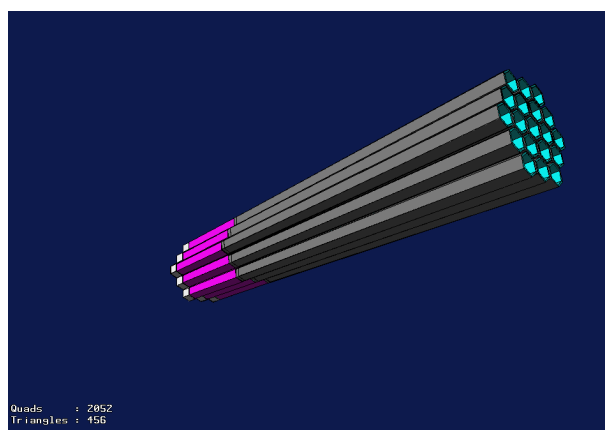


図 6.7: シミュレーションによる19ユニットのジオメトリ

性能実証試験を行うにあたって実験データとシミュレーションの結果を比較するという方法を取る。実機同様に、プラスチックによってslowプラスチックシンチレータ、fastプラスチックシンチレータ、BGOによってBottom部BGOシンチレータを組み合わせることでPDCユニットをシミュレーター上で再現し、19ユニット蜂の巣構造に並べた(図6.7)。

今回もシミュレーション上では、ビームの偏光の向きを回転させる事で、偏光の異方性を調べる。各角度100万イベントずつ偏光度100%の50keVビームを検出器の中心ユニットに照射し、イベントデータを取得する。シミュレーションした上で、実機と同様のイベントセレクションをかけ、解析を行った。

6.3 2ヒットイベントにおける性能評価

この節では19ユニットのうち、2つのユニットで反応が起こっているイベント(以下、2ヒットイベント)を取扱い、偏光の異方性を求める。つまり図6.2の様に、中心ユニット

に偏光ビームを照射し、中心ユニットのプラスチックシンチレータを散乱体としてコンプトン散乱を起こし、周りの別のユニットのプラスチックシンチレータを吸収体として光電吸収を起こす様なイベントを扱う。

この際、図 6.2 の色分けによって示された様に、吸収体となるユニットは、中心ユニットと吸収体ユニットまでの中心間距離によって 6 ユニットずつ、3 つのグループに分けることができる。以下の解析ではこれらのグループに分けて解析を行っていく。2 層目に置かれているユニットグループを Inner Ring、3 層目のうち比較的近い 6 ユニットの Outer Ring1、比較的遠い 6 ユニットの Outer Ring2 と名付ける。

6.3.1 解析方法

波形弁別

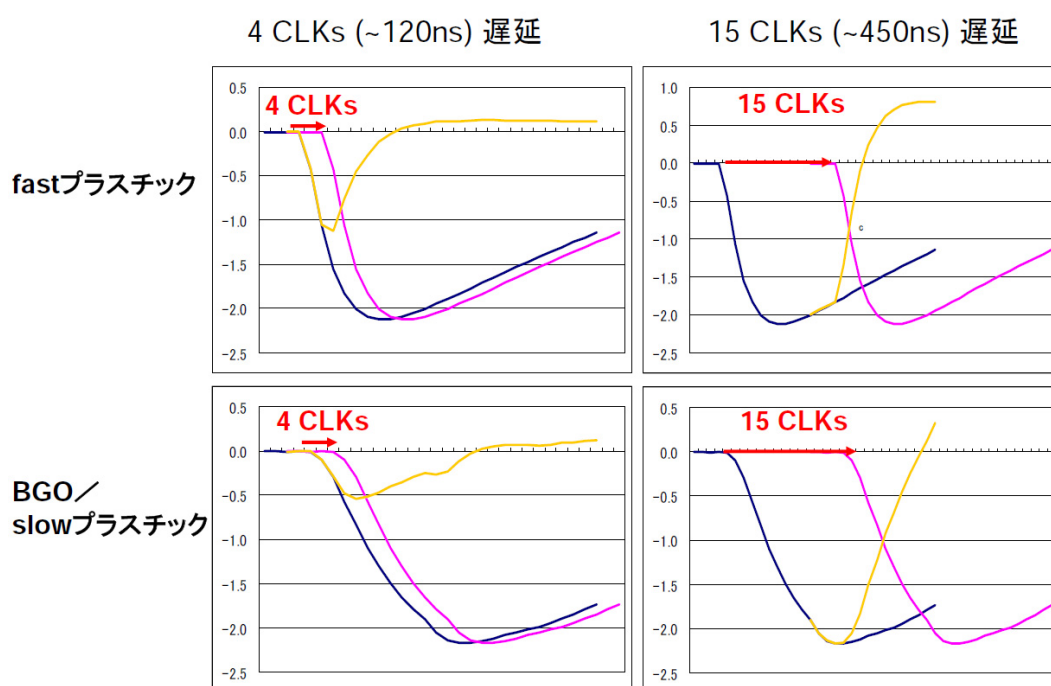


図 6.8: シンチレータの信号の立上りの違いについて:青で描かれた波形が元の波形、赤が遅延させた波形、黄が 2 つの波形の差分。黄の波高値をそれぞれ fast 波高値、slow 波高値とする。

本試験に用いた試験では 3 つの異なるシンチレータの信号を一本の PMT でまとめて読み出しているため、取得したデータには 3 つの信号が混ざって存在している。この中から、主検出部にあたる fast プラスチックシンチレータの信号のみを取り出し、解析に用いる必要がある。このため、本解析では波形弁別と呼ぶ手法を用いる。FADC Board ではシンチレータからの出力信号を 36 MHz のサンプリングレートで波形のまま取得できる。この手法では、それぞれのシンチレータの減衰時定数の違いから表れるこの出力信号波形の立ち上がり時間の異なり (図 6.8) を利用している。得られた波形データから 15 クロック (約 450 ns) 遅らせた波形データの差分をとり、その最大値を Slow の波高値、同様に 4 クロック (約 120 ns) 遅らせた波形データの差分をとった、その最大値を Fast の波高値とする。この二つの波高値を得られた全てのイベントについて求め、Fast 波高値を X 軸に、

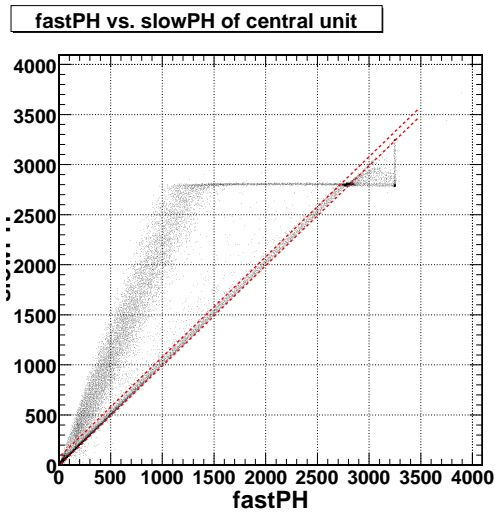


図 6.9: 波形弁別による 2 次元ヒストグラム

Slow 波高値を Y 軸でプロットすると、図 6.9 の様な二次元ヒストグラムが得られる。立上りの早い fast プラスチックシンチレータの信号は Fast 波高値と Slow 波高値がほぼ等しい関係であるのに対し、slow プラスチックシンチレータや BGO の信号は Slow 波高値が大きくなるため、二次元ヒストグラム上では二本の branch として表れ、fast プラスチックシンチレータの信号と slow プラスチックシンチレータ/BGO の信号を分ける事ができる。この遅延による波形弁別は東京工業大学河合研究室の金井らによって考案されたものである。こうして fast プラスチックシンチレータで反応したイベントのみを取り出し、解析に用いていく。今回用いた遅延時間について、fast 波高値を求める際の 4 クロックはプリアンプの立上り時間 (~ 100 ns) より長く、できるだけ短い遅延時間を、また slow 波高値を求める 15 クロックは BGO の減衰時定数 (~ 300 ns) に近い値として選んだ。なお、この波形弁別は 2 ヒットイベントの解析のみならず、後に記載する 3 ヒットイベントの解析にも用いている。

イベントセレクション

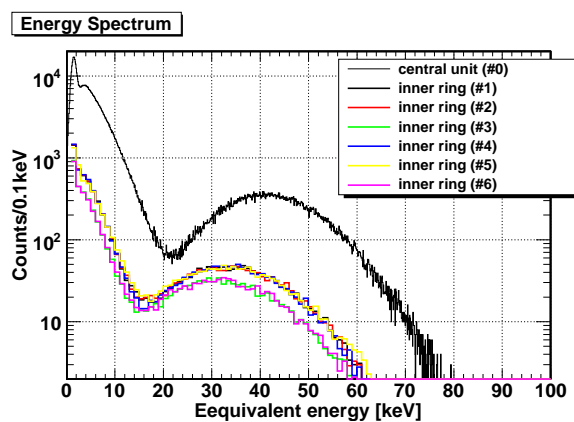


図 6.10: シミュレーションによる中心ユニットと Inner Ring ユニットで得られるエネルギースペクトル

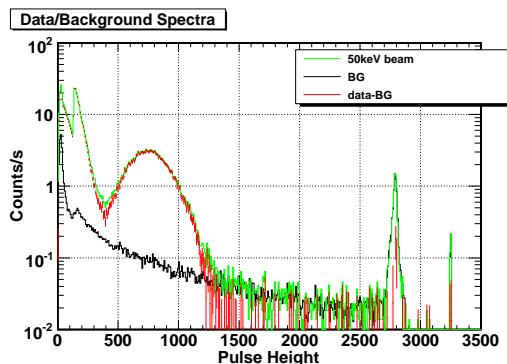


図 6.11: 中心ユニットのエネルギースペクトル

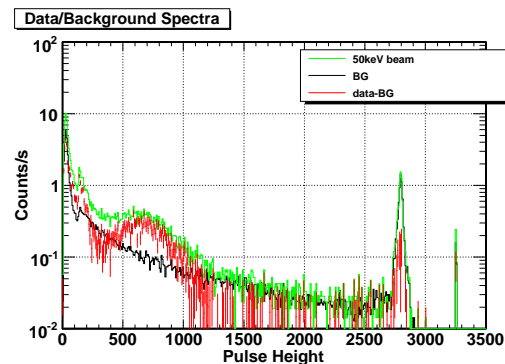


図 6.12: 2 ヒットイベントにおけるユニット 1 のエネルギースペクトル

上述の波形弁別を用いて得られた主検出部である fast プラスチックシンチレータのデータから 2 ヒットイベントのセレクションを行う。

この波形弁別によって得られたデータのうち、各ユニットにおいて、ディテクションスレッシュホールドと呼ぶある閾値以上のエネルギーを落としたイベントを実際に主検出部で反応が起きた信号とし、それ以下のイベントは全て雑音として扱う。今回はディテクションスレッシュホールドを 1keV として解析を進めた。このエネルギーは、1 photon のピークよりも小さく、かつノイズより大きいエネルギーとして設定された。

本節では 2 ヒットイベントの解析を取り扱うため、取得したデータのうち、2 つの PMT でディテクションスレッシュホールドを越えるイベントのみを選び出す。これによって選ばれたイベントの中には、中心でコンプトン散乱し、周りのユニットでもコンプトン散乱してしまうイベントや、バックグラウンドによって周りのユニットでコンプトン散乱を起こし、別のユニットでもコンプトン散乱や光電吸収を起こすイベントなども含まれてしまう。ここでは、中心ユニットでコンプトン散乱を起こし、なおかつ、周りのユニットで散乱光を光電吸収を起こすイベントを抜き出すために、それぞれのユニットでのエネルギースペクトルを描き、そのピークからイベントセレクションを行う。

ここでは例として、中心ユニットでコンプトン散乱を起こし、Inner Ring のユニット 1 によって光電吸収が起こった 2 ヒットイベントを例にデータのセレクションについて述べていく。

図 6.10 はシミュレーションによる中心ユニット及び Inner Ring ユニットで得られるスペクトルである。このスペクトルには 5 章で求めたシンチレータの光量のエネルギー依存性及び集光率の位置依存性を全て取り込んであり、横軸は fast プラスチックシンチレータの根元で 50 keV の X 線が全て吸収された際の光量との比で表している。黒で示されたスペクトルは中心ユニットで得られるスペクトルであり、およそ 25 keV より高エネルギー側に広がっているピークは光電吸収イベントによるものである。また、およそ 25 keV 以下に広がるピークはコンプトン散乱イベントである。一方その他の色で示されたスペクトルは Inner Ring に含まれるユニットにおけるものである。Inner Ring のユニットでは中心ユニットでコンプトン散乱された散乱光を捉えたスペクトルとなる。そのため、入射光子の持つエネルギーが本来のビームよりも小さくなるため、そのスペクトルの形状は中心ユニットと変わらないが、イベントピークの位置は全体的に低エネルギー側にシフトする。また、中心ユニットのピークが 50 keV より低いのは、集光率の位置依存性のためである。これらのスペクトルのピークのエネルギー帯域を実験で得られたデータのセレクションに用いることとする。

図 6.11 は中心ユニットでのエネルギースペクトルである。高エネルギー側 400 チャン

ネルから 1200 チャンネルあたりに見られるピークが光電吸収のイベント、より低チャンネル側に見られるピークがコンプトン散乱に対応している。この中心ユニットではコンプトン散乱でのイベントピークを選ぶため、シミュレーションのスペクトル (図 6.10) より、そのセレクション帯域を 0~24 keV とし、それに対応する実験データスペクトル (図 6.11) のおよそ 0~430 チャンネルの部分セレクション領域とした。

一方、周りのユニットの一つである Inner Ring に位置するユニット 1 で得られたスペクトルが図 6.12 である。2 ヒットイベントでは、このユニットで光電吸収を起こしたイベントを扱うため、スペクトルから光電吸収ピーク値を選ぶ。中心ユニット同様シミュレーションのスペクトルより、Inner Ring ユニットにおける光電吸収ピークを 16~65 keV とし、それに対応するおよそ 300~1300 チャンネルをセレクション領域として取り扱った。上記と同様のセレクションをバックグラウンドイベントにも適応させる。

これらのイベントセレクションを満した 2 ヒットイベントのカウントを各角度でそれぞれ測定にかかった時間で規格化し、同様に時間で規格化したバックグラウンドのカウントを差し引いた上で横軸測定角度、縦軸イベントカウント数としてプロットしモジュレーションカーブを描いた (図 6.13)。またシミュレーションにも同様のイベントセレクションをかけ、モジュレーションカーブを描く (図 6.16)。それぞれのモジュレーションカーブを式 4.3 でフィッティングを行いモジュレーションカーブを求める。上記のような解析方法を他のユニット、及び Outer Ring1、Outer Ring2 にも適応する。

なお、実際の PoGO Lite の観測では天体からの X 線偏光を測定するため、本試験のような単色のビームではなく、X 線の入射位置も分かっていない。そのため検出器全体に X 線が照射されているとしてエネルギー応答をシミュレーションにより作成し、実天体のスペクトル・偏光情報を導き出す。一方、本研究は 19 ユニットプロトタイプ検出器の性能を実証し、またその応答が正しくシミュレーションによって再現できることを確認する試験である。そこでイベントの取得率 (統計) をあげ、また解釈をしやすくするため、ビームの情報を用いたイベントセレクションを行っている。

6.3.2 結果

モジュレーションファクターの解析

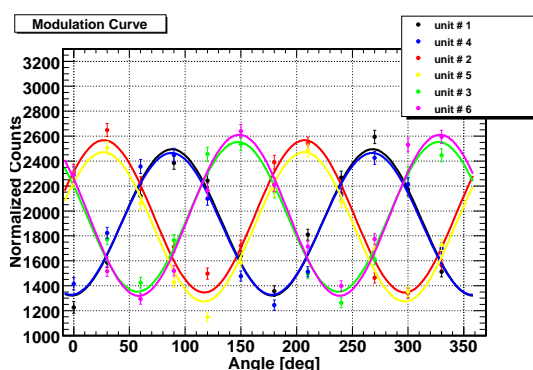


図 6.13: 2 ヒットイベント解析による InnerRing のモジュレーションカーブ

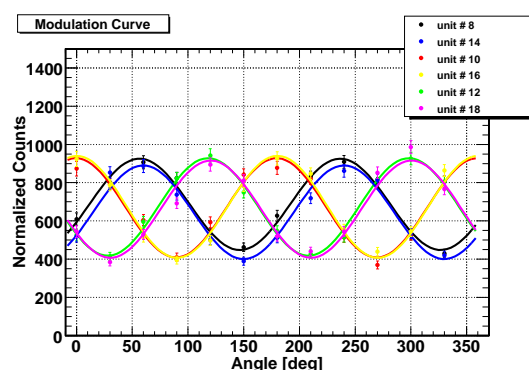


図 6.14: 2 ヒットイベント解析による OuterRing1 のモジュレーションカーブ

図 6.13、6.14、6.15 はそれぞれ Inner Ring、Outer Ring1、Outer Ring2 の 6 ユニットずつによって得られたモジュレーションカーブである。いずれも中心ユニットに対して向か

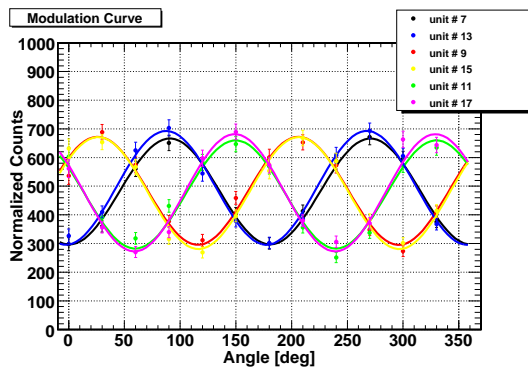


図 6.15: 2 ヒットイベント解析による OuterRing2 のモジュレーションカーブ

い合う2つのユニットが同じパターンでシミュレーションを示し、振幅の大きさもユニット間で大きな差がなく、正しく偏光由来の異方性を捉えることができている。それぞれのモジュレーションカーブを式 4.3 でフィッティングを行ったところ、各ユニットのモジュレーションファクター MF として表 6.3 にまとめた実験値を得た。各ユニットではばらつきがあるが、統計誤差と考えて差し支えない範囲である。ここで得られた MF を各リングごとに平均値をとり、その値をそのリングで得られた MF の実測値とする。その結果、各リングの MF として Inner Ring、OuterRing1、OuterRing2 の順に、 $31.30 \pm 0.41 \%$ 、 $37.97 \pm 0.66 \%$ 、 $40.08 \pm 0.79 \%$ が得られた。これも表 6.3、6.4、6.5 にまとめる。

表 6.3: 2 ヒットイベント解析における InnerRing の各ユニットの MF と MF_{100}

Inner Ring (ID)	MF	MF_{100}
1	$30.80 \pm 1.02 \%$	$36.83 \pm 0.55 \%$
2	$31.25 \pm 0.98 \%$	$36.54 \pm 0.55 \%$
3	$30.78 \pm 0.98 \%$	$37.52 \pm 0.54 \%$
4	$30.04 \pm 1.02 \%$	$37.18 \pm 0.54 \%$
5	$32.04 \pm 0.99 \%$	$36.70 \pm 0.55 \%$
6	$32.91 \pm 0.98 \%$	$38.04 \pm 0.54 \%$
Average	$31.30 \pm 0.41 \%$	$37.14 \pm 0.22 \%$

表 6.4: 2 ヒットイベント解析における OuterRing1 の各ユニットの MF と MF_{100}

Outer Ring1 (ID)	MF	MF_{100}
8	$34.79 \pm 1.60 \%$	$45.67 \pm 0.87 \%$
10	$38.90 \pm 1.61 \%$	$44.11 \pm 0.87 \%$
12	$37.92 \pm 1.61 \%$	$45.83 \pm 0.88 \%$
14	$37.95 \pm 1.65 \%$	$43.97 \pm 0.87 \%$
16	$39.62 \pm 1.62 \%$	$44.37 \pm 0.88 \%$
18	$38.64 \pm 1.62 \%$	$43.97 \pm 0.88 \%$
Average	$37.97 \pm 0.66 \%$	$44.65 \pm 0.36 \%$

表 6.5: 2 ヒットイベント解析における OuterRing2 の各ユニットの MF と MF_{100}

Outer Ring2 (ID)	MF	MF_{100}
7	$38.37 \pm 1.99 \%$	$43.91 \pm 1.06 \%$
9	$38.95 \pm 1.91 \%$	$44.19 \pm 1.06 \%$
11	$40.06 \pm 1.93 \%$	$46.26 \pm 1.06 \%$
13	$40.19 \pm 1.98 \%$	$43.50 \pm 1.07 \%$
15	$40.04 \pm 1.93 \%$	$45.68 \pm 1.07 \%$
17	$42.84 \pm 1.94 \%$	$45.49 \pm 1.06 \%$
Average	$40.08 \pm 0.79 \%$	$44.84 \pm 0.43 \%$

図 6.16 に Inner Ring についてシミュレーションで得られた 100 % 偏光に対するモジュレーションカーブを示す。Outer Ring についても同様のカーブが得られた。これらを同様に式 4.3 によってフィッティングすることで各ユニットにおけるモジュレーションファクター MF_{100} を求める (表 6.3、6.4、6.5)。それらの平均をとり、それを各ユニットの MF_{100} とすると、Inner Ring、Outer Ring1、Outer Ring2 の順に $37.14 \pm 0.22 \%$ 、 $44.65 \pm 0.36 \%$ 、 $44.84 \pm 0.43 \%$ となった。

これらに 4 章で求めた KEK PF BL14-A の偏光度 89.7 % をかけることで、シミュレーションによる MF の予想値を求めることができる。これらの結果を表 6.6 にまとめておく。

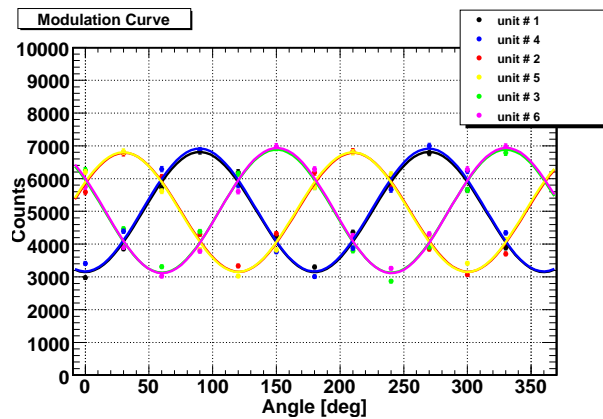


図 6.16: シミュレーションによる 2 ヒットイベント解析の InnerRing のモジュレーションカーブ

表 6.6: 2 ヒットイベントにおける MF のまとめ: MF (実測値) と MF (シミュレーション) が直接比較するべきものである。

Ring	MF (実測値)	MF_{100}	MF (シミュレーション)
Inner Ring	$31.30 \pm 0.41 \%$	$37.14 \pm 0.22 \%$	$33.31 \pm 0.20 \%$
Outer Ring1	$37.97 \pm 0.66 \%$	$44.65 \pm 0.36 \%$	$40.05 \pm 0.32 \%$
Outer Ring2	$40.08 \pm 0.79 \%$	$44.84 \pm 0.43 \%$	$40.22 \pm 0.39 \%$

これらの値をグラフに表したものが図 6.17 である。この図の横軸は RingID とし、1 を Inner Ring、2 を Outer Ring1、3 を Outer Ring2 としてそれぞれの MF をプロットした。

この結果、Inner Ring の MF の実測値をシミュレーションによって相対値でおよそ 6 %、Outer Ring1 ではおよそ 5 %、Outer Ring2 では 1 % 以下の精度で再現できることを確認できた。

散乱体ユニットと吸収体ユニットの距離が遠いほど、より散乱の異方性を精度よく測定できるため、 MF 値は中心ユニットより距離が遠いほど良くなる。一方、検出するイベント数が減るため、二つのユニットの距離が遠いほど統計誤差は大きくなるが、今回の Outer Ring2 でも高々 0.8 % である。図 6.17 のシミュレーションと実測値の MF のずれは検出器の組み立ての際のずれやビーム照射点が中心ユニットの中心からずれていることに起因していると考えられる。本試験に用いたプロトタイプ検出器は 19 ユニット本の PDC ユニットの作業で組み上げている。その際、1~2 mm 程度のユニット同士の位置関係にずれが生じる。中心ユニットから近い Inner Ring や Outer Ring1 におけるユニットでは、その組み上げ時のユニットの位置のずれは散乱角 ϕ の誤差に大きく影響するため、精度が落ちており、その結果シミュレーションとのずれが生じると考えられる。

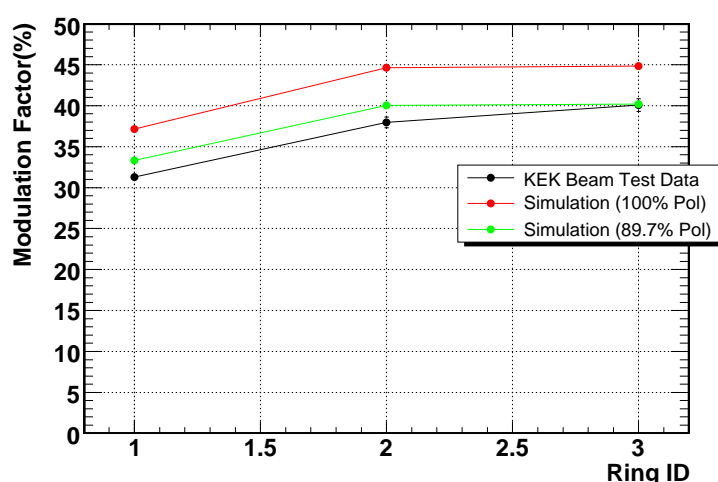


図 6.17: モジュレーションファクターの実測値とシミュレーションの比較

検出効率の解析

ここでは、上記の解析に使用したイベントの検出効率 (以下、Efficiency[2]) E を求める。この Efficiency は実際の天体の信号強度を求める有効面積に直結した性能であり、 MF と並んで重要なパラメータである。Efficiency を実測値とシミュレーション値を比較し、シミュレーションの再現性を確認することで、信頼性を評価することができる。

本研究における Efficiency E は “検出器に入射した全光子数” に対する “散乱の異方性を測るために検出できたイベント数 (今回は 2 ヒットイベントの数)” として求められ、それぞれを N_0 、 N_{comp} とすると、Efficiency は $E = N_{\text{comp}}/N_0$ と表される。このとき、 N_0 は

$$N_0 = \frac{N_{\text{abs}}}{p} \quad (6.1)$$

$$p = \frac{N_{\text{abs-sim}}}{N_{0\text{-sim}}} \quad (6.2)$$

として求めることができる。但し、 N_{abs} は中心ユニットでそのまま光電吸収したイベント数、 p はシミュレーションにおける “入射ビーム数 $N_{0\text{-sim}}$ ” に対する “光電吸収ピークに

属するイベント数 $N_{\text{abs-sim}}$ の割合を示す。光電吸収の断面積はよく分かっており、またスペクトルでコンプトン散乱部と明確に区別できるため、シミュレーションで求めた p を実データに適用しても不定性は小さい。この p と N_{abs} を用いることで、入射ビームの光子数 N_0 、ひいては検出効率を求めることが可能となる。

上述の式を用いて求めた、各 Ring における Efficiency E の実測値、シミュレーション値を表 6.7 にまとめた。また、これらの値をグラフにしたものが図 6.18 6.19 となる。この結果、2 ヒットの Efficiency についても実測値をシミュレーションによって相対値で約 5 % 以内の精度で再現できることを確認できた。

表 6.7: 2 ヒットイベントにおける Efficiency

Ring	E (実測値)	E (シミュレーション)
Inner Ring	$3.133 \pm 0.011 \%$	$2.991 \pm 0.005 \%$
Outer Ring1	$1.085 \pm 0.005 \%$	$1.098 \pm 0.003 \%$
Outer Ring2	$0.781 \pm 0.005 \%$	$0.749 \pm 0.003 \%$

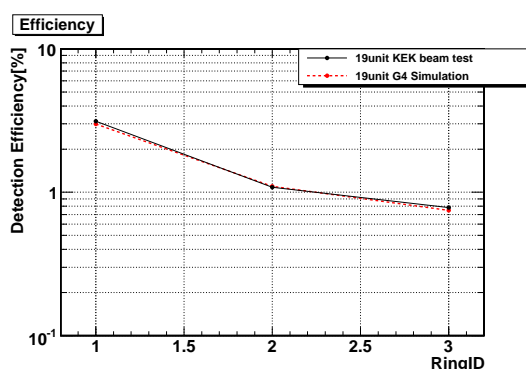


図 6.18: Efficiency の実測値とシミュレーションの比較 1。黒は実測値、赤はシミュレーション値

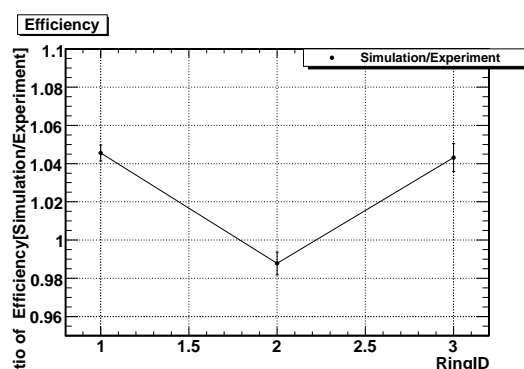


図 6.19: Efficiency の実測値とシミュレーションの比較 2。シミュレーション/実測値

6.4 3 ヒット イベント における 性能 評価

この節では 19 あるユニットのうち、3 つのユニットで反応が起きているイベント (以下、3 ヒット イベント) を取扱い、偏光の異方性を調べる。ここで述べる 3 ヒット イベントは偏光ビームが直接入射する中心ユニットでの一次散乱に加え、その散乱光をそれとは別のユニットで再度散乱 (二次散乱) し、更にその他のユニットで光電吸収を行うイベントの事を指す。

偏光ビームがコンプトン散乱を起こす際、その散乱光子には異方性が見られるが、散乱角 θ が 90 度に近いほど、この散乱光子の異方性はよく見られ、散乱角 θ が小さい時はビームの進行方向はほとんど変わらず、この異方性もあまり見られない (図 2.6)。今回の 3 ヒット イベントは、一次散乱・二次散乱の散乱角 θ の大きさによって大きく二種類のイベントに分けられる。一つ目は、偏光ビームが中心ユニットで一次散乱を起こす際、その散乱角 θ が 90 度に近い場合である。この時、一次散乱の段階で散乱の異方性が見られ、二次散

乱の起こる周りのユニットでの散乱角 θ は小さく散乱光の進行方向はあまり変わらず、吸収体ユニットにて光電吸収される。二つ目は、中心ユニットでの一次散乱の散乱角 θ が小さい場合、そこでは散乱の異方性が現れず、散乱光はビームの進行方向、偏光ベクトルの向きもあまり変わらないまま周りのユニットに入射する。そこで起こる二次散乱の散乱角 θ が大きい場合、更にその周りのユニットによって散乱の異方性が検出される。この散乱角 θ の大きさによって散乱光子のエネルギーの大きさが異なる (式 2.2)。 θ が 90 度の時、散乱光子のエネルギーは小さく、PMT によって検出されるエネルギーは大きくなる。一方 θ が 0 度付近であった場合、散乱光子のエネルギーは入射ビームのエネルギーと変わらず、検出されるエネルギーは 0 に近くなる。なお、90 度を大きく越えるような大角度散乱は起こる確率が小さい。

本節では上記に記した二種類の 3 ヒットイベントのうち、特に前者について解析を進めていく。つまり、図 6.3 の様に、中心ユニットに照射した偏光ビームが中心ユニットの fast プラスチックシンチレータを散乱体として約 90 度のコンプトン散乱を起こし、その散乱光が 2 層目のユニットに入射し、再度散乱を起こし、更にその散乱光が 3 層目のユニットに入射され光電吸収される様なイベントを扱う。3 ヒットイベントに関しても 2 ヒットイベント同様、吸収体となる 3 層目のユニットを散乱体である中心ユニットと吸収体ユニットまでの中心間の距離によって 2 つのグループに分けて解析を進める。なお、それぞれのユニットグループは 2 ヒットイベントの解析時と同様、中心ユニットから比較的近い 6 つのユニットグループを Outer Ring1、比較的遠い 6 つのユニットグループを Outer Ring2 と名付ける。

6.4.1 解析方法

イベントセレクション

ここでは 3 ヒットイベントのセレクションを行う。本解析に用いるイベントは、2 ヒットイベントの解析時と同様、波形弁別により fast プラスチックシンチレータで反応したイベントのみを切り出したものを解析に用いる。また、今回のディテクションスレッシュホルドも 2 ヒットイベントの解析同様、1 keV とする。

まず始めに 3 ヒットイベントの選別を行う。波形弁別によって得られたデータのうち、3 つのユニットからディテクションスレッシュホルドを越えるエネルギーが検出されたイベントのみを選び出す。しかし、この段階では、上述のように二種類の 3 ヒットイベントが分別できておらず、またその他のバックグラウンド起源の 3 ヒットイベントや、二次散乱の後に光電吸収されず再度散乱してしまったイベントも含まれている。二種類の 3 ヒットイベントの分別を行い、かつこれらのイベントを取り除くため、以下に沿ってさらなるイベントセレクションを行っていく。

本解析で用いる 3 ヒットイベントは、中心ユニットで散乱角 θ の大きいコンプトン散乱を起こす場合である。この時、一次コンプトン散乱、二次コンプトン散乱、光電吸収のそれぞれの反応で検出されるエネルギーを E_{scat1} 、 E_{scat2} 、 E_{abs} とすると、

$$E_{\text{abs}} > E_{\text{scat1}} \geq E_{\text{scat2}}$$

のように、光電吸収で検出されるエネルギーが最も高く、次に一次コンプトン散乱、最も検出エネルギーが低いものが二次コンプトン散乱となる。この検出されるエネルギーの関係からそれぞれのユニットで検出されたエネルギーが何の反応によるものなのかを調べ

る。今回は中心ユニットにおいて、散乱角 θ が大きい散乱を起こすイベントを選ぶため、実際に 3 ヒットイベントの 3 つのユニットで検出されたエネルギー値を比較し、

$$E_{\text{Outer}} > E_{\text{Central}} > E_{\text{Inner}}$$

となるイベントを抜き出す。ここで E_{Outer} は Outer Ring1 または Outer Ring2 のユニットによって検出されたエネルギー、 E_{Central} は中心ユニットによって検出されたエネルギー、 E_{Inner} は Inner Ring のユニットによって検出されたエネルギーである。また、上記の条件を満たすイベントについて、中心ユニットで検出されたエネルギーを X 軸、イベント全体で検出されたエネルギー値の総和を Y 軸としてプロットすることで図 6.20 のような二次元ヒストグラムが得られる。この二次元ヒストグラムにより、3 ヒットイベントのそれぞれのユニットで検出されるエネルギーの最適値を見積り、セレクションを行う。中心ユニットのコンプトン散乱によって落とされたエネルギーのセレクション領域を 1 ~ 14 keV、イベント全体で検出されたエネルギーの総和のセレクションを 20 ~ 60 keV とし、またそれに加え、総和エネルギーに対し中心ユニットで検出されたエネルギーが一回のコンプトン散乱にしては高すぎるイベントもバックグラウンドとして除去した(図の斜め線)。これらのセレクション領域を図 6.20 に赤の点線で囲んで示した。

更にこれらの条件を満たすイベントのうち E_{abs} がエネルギースペクトルにおいて正しく光電吸収ピークに属しているものをセレクションする。図 6.21 はシミュレーションから求めた 3 ヒットイベントにおける Outer Ring1、Outer Ring2 のユニットで得られるエネルギースペクトルを足しあわせたものである。このエネルギースペクトルから光電吸収ピークを 16 ~ 65 keV とし、 E_{abs} のセレクション領域とした。

上記の全てのセレクションを満たした 3 ヒットイベントのカウント数を用いてモジュレーションカーブを描く。最後の光電吸収がおこったユニットごとにカウント数を求め、各角度の測定にかかった時間により規格化する。また、バックグラウンドイベントについても上記のセレクションをかけ、カウント数を測定時間で規格し、実験データから差し引く。このようにして得られた 3 ヒットイベントの規格化したカウント数を縦軸に、測定した角度を横軸にプロットすることで、モジュレーションカーブを描いた。結果を図 6.22、6.23 に示す。式 4.3 を用いてフィッティングを行い、モジュレーションファクターを求めることができる。

また、シミュレーションに関しても上記と同じデータセレクションを行い、モジュレーションカーブ、モジュレーションファクターを求めた結果を図 6.24、6.25 に示す。

6.4.2 結果

モジュレーションファクターの解析

上記の解析手法を用いて得た Outer Ring1 および Outer Ring2 のそれぞれ 6 ユニットずつのモジュレーションカーブが図 6.22、6.23 であり、それぞれを三角関数(式 4.3)によってフィッティングを行い、モジュレーションファクター MF を求めた結果を表 6.8、6.9 にまとめる。2 ヒットイベントの解析と同様、それぞれの Ring について 6 つのユニットの平均を求め、その値をその Ring でのモジュレーションファクターとする。その結果、Outer Ring1、Outer Ring2 の 3 ヒットイベントの実測値としてそれぞれ $21.05 \pm 1.42 \%$ 、 $24.33 \pm 1.73 \%$ を得た。

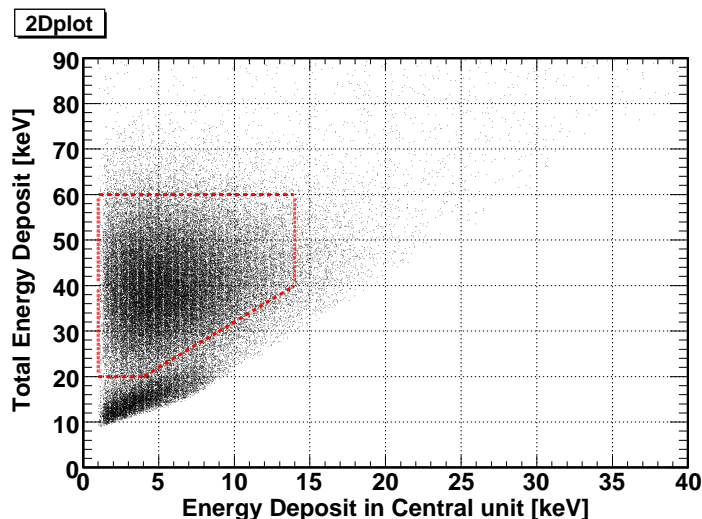


図 6.20: 3 ヒットイベントにおける 2 次元ヒストグラム。X: 中心ユニットで検出されたエネルギー Y: イベント全体で検出されたエネルギー。3hit イベントのセレクションの最適化を計る。赤の点線で囲んだ領域が本解析でのセレクション領域

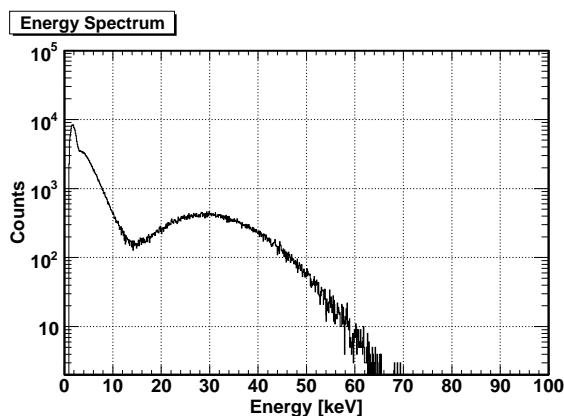


図 6.21: シミュレーションによる 3 ヒットイベントでの OuterRing のユニットで得られるエネルギースペクトル

表 6.8: 3 ヒットイベント解析における Outer Ring1 の各ユニットの MF および MF_{100}

Outer Ring1 (ID)	MF	MF_{100}
8	$18.92 \pm 3.49 \%$	$23.95 \pm 2.10 \%$
10	$24.65 \pm 3.51 \%$	$28.64 \pm 2.06 \%$
12	$13.24 \pm 3.49 \%$	$22.39 \pm 2.08 \%$
14	$23.64 \pm 3.31 \%$	$24.67 \pm 2.10 \%$
16	$22.39 \pm 3.68 \%$	$26.30 \pm 2.05 \%$
18	$23.44 \pm 3.39 \%$	$21.86 \pm 2.10 \%$
Average	$21.05 \pm 1.42 \%$	$24.64 \pm 0.85 \%$

またシミュレーションについても、各ユニットのモジュレーションカーブからそれぞれの 100 % 偏光に対するモジュレーションファクター MF_{100} を求めた (表 6.8、6.9)。それぞれのリングで平均を求め、それぞれの Ring の MF_{100} は Outer Ring1、Outer Ring2 の順に $24.64 \pm 0.85 \%$ 、 $25.29 \pm 1.01 \%$ となった。

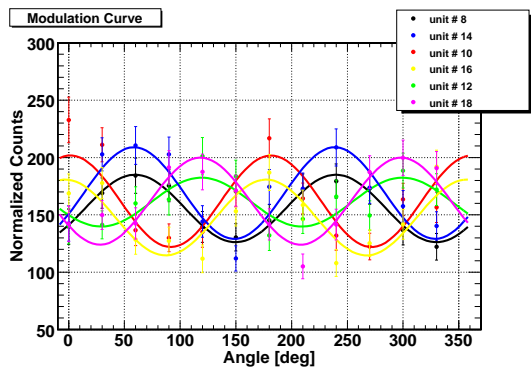


図 6.22: 3 ヒットイベント解析による OuterRing1 のモジュレーションカーブ

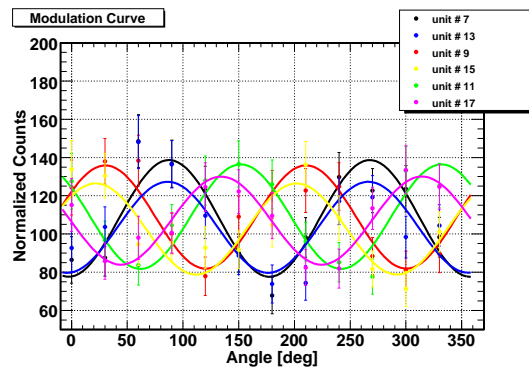


図 6.23: 3 ヒットイベント解析による OuterRing2 のモジュレーションカーブ

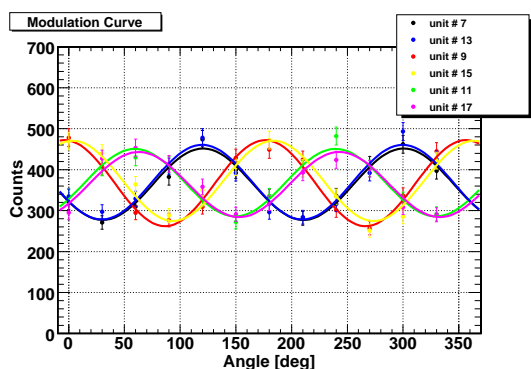


図 6.24: シミュレーションによる OuterRing1 のモジュレーションカーブ

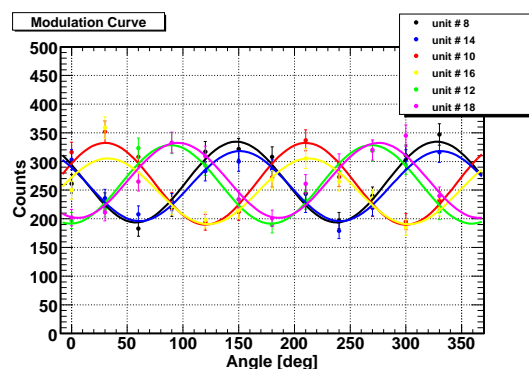


図 6.25: シミュレーションによる OuterRing2 のモジュレーションカーブ

これらの値から、2 ヒットイベント解析と同様に、偏光度 89.7 % に対するモジュレーションファクターの予想値を求めるとそれぞれ、 $22.10 \pm 0.76 \%$ 、 $22.69 \pm 0.91 \%$ となった。これら、3 ヒットイベント解析の結果を表 6.10 にまとめた。

3 ヒットイベントは 2 ヒットイベントに比べ統計が少なく、統計誤差が大きくなる。また、モジュレーションファクターについても 3 ヒットイベントでは 2 ヒットイベントに比べ小さくなる傾向があるが、これは検出部内で二度散乱することで、散乱角 θ が 90 度からずれ、散乱の異方性が見られにくくなるためだと考えられる。但し、3 ヒットイベントを扱うことで、2 ヒットイベントのみを扱うよりもイベント数を増やすことができるため、特に光子数の限られる天体観測では重要となる。図 6.26 は 3 ヒットイベントにおけるモ

表 6.9: 3 ヒットイベント解析における Outer Ring2 の各ユニットの MF および MF_{100}

Outer Ring2 (ID)	MF	MF_{100}
7	$28.26 \pm 4.24 \%$	$26.66 \pm 2.44 \%$
9	$24.81 \pm 4.09 \%$	$27.32 \pm 2.47 \%$
11	$25.08 \pm 4.15 \%$	$26.36 \pm 2.46 \%$
13	$23.03 \pm 4.46 \%$	$23.78 \pm 2.48 \%$
15	$23.25 \pm 4.34 \%$	$23.13 \pm 2.55 \%$
17	$21.55 \pm 4.16 \%$	$24.50 \pm 2.45 \%$
Average	$24.33 \pm 1.73 \%$	$25.29 \pm 1.01 \%$

表 6.10: 3 ヒットイベントにおける MF のまとめ

Ring	MF (実測値)	MF_{100}	MF (シミュレーション)
Outer Ring1	$21.05 \pm 1.42 \%$	$24.64 \pm 0.85 \%$	$22.10 \pm 0.76 \%$
Outer Ring2	$24.33 \pm 1.73 \%$	$25.29 \pm 1.01 \%$	$22.69 \pm 0.91 \%$

シミュレーションファクターのシミュレーションと測定値との比較である。横軸の RingID は、1 が Outer Ring1、2 が Outer Ring2 としてプロットした。それぞれの Ring での MF の実測値をシミュレーションによって相対値でおよそ 5 %、7 % の精度で再現することを確認できた。また、統計誤差が相対値でそれぞれ 7 %、8 % あるため、統計誤差の範囲内で再現できていることになる。

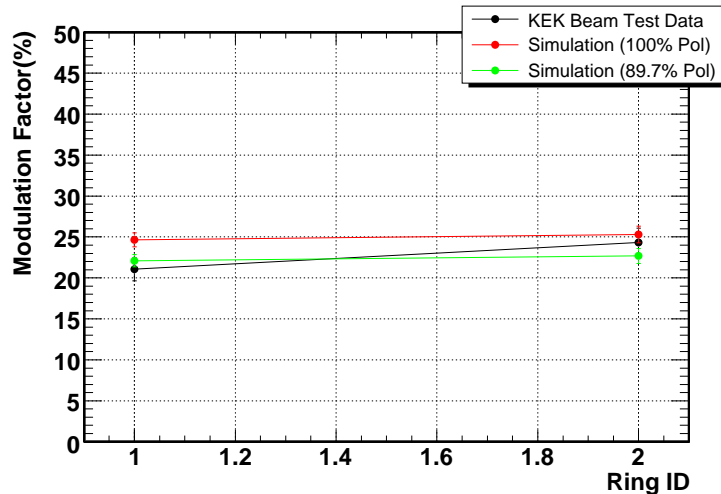


図 6.26: 3 ヒットイベントにおけるモジュレーションファクターの実測値とシミュレーションの比較

検出効率の解析

また 3 ヒットイベントにおいても 2 ヒットイベント解析時と同様に Efficiency E を求めた。結果を表 6.11、及び図 6.27、6.28 にまとめる。3 ヒットイベント解析において、Efficiency に関して Outer Ring1 では 7 % 以内、Outer Ring2 では 2 % 以内の精度で実測値をシミュレーションで再現できることを確認した。こうして 3 ヒットイベントも MF 及び検出効率をシミュレーションにより相対値で 5 % 程度以内の精度で再現することができ、天体観測の際に用いることができる目処が立った。

表 6.11: 3 ヒットイベントにおける Efficiency

Ring	E (実測値)	E (シミュレーション)
Outer Ring1	$0.260 \pm 0.003 \%$	$0.243 \pm 0.001 \%$
Outer Ring2	$0.174 \pm 0.002 \%$	$0.171 \pm 0.001 \%$

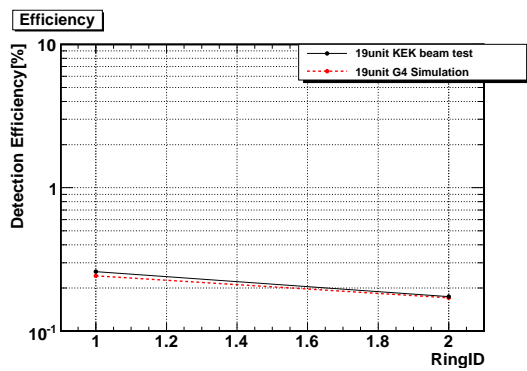


図 6.27: Efficiency の実測値とシミュレーションの比較 1。黒は実測値、赤はシミュレーション値

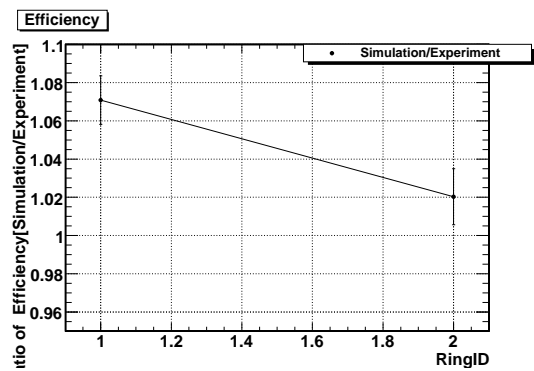


図 6.28: Efficiency の実測値とシミュレーションの比較 2。シミュレーション/実測値

第7章 まとめと今後

X線偏光観測は、それによってしか解明できない物理があるにも関わらず、その観測自体の困難さから未だ有意な観測は2例しか存在していない。そこで現在、気球による硬X線偏光観測を目指し、我々は宇宙硬X線偏光検出器 PoGOLite の開発を進めている。その検出器による観測性能の予想や、観測データの解析に使用される応答関数の構築にはシミュレーションが用いられる。このシミュレーションのフィードバックおよび、検出器の偏光検出性能の実証を目指し、本研究では19ユニットから成る PoGOLite プロトタイプ検出器の実証試験を KEK PF BL14-A のシンクロトンビームを用いて行った。また本試験はフライトモデルの検出器・データ読み出しシステムを使用しており、実機と同等の構成での試験となった。

実証試験を行うに当たり、試験に用いるビームの特性、及び検出器の特性をあらかじめ知っておく必要がある。そのため、本研究ではまず PF BL14-A のビームの偏光度を測定するための偏光計のデザイン決定・製作を行い、その性能を99%以上の偏光度を持つ SPring-8 BL20B2 のビームを用いて評価した。その結果、その性能は約1%の精度でビームの偏光度を求められること分かった。この偏光計を KEK PF BL14-A に持ち込み、シンクロトンビームの偏光度を測定したところ、88~90%だと求まった。また検出部の特性として、PoGOLite の主出部の fast プラスチックシンチレータの光量のエネルギー依存性・集光率の位置依存性について調べ、これらの結果を全て踏まえた上で PoGOLite19 ユニットプロトタイプの性能実証試験に臨んだ。その結果、モジュレーションファクター MF の実測値をシミュレーションにより、2ヒットイベントでは相対値で5%程度以下、3ヒットイベントについては7%程度以下の精度で再現できることを確認できた。また、有効面積に直結した性能である、イベントの取得効率である Efficiency E についても評価を行った。その結果、2ヒットイベントでは相対値で5%程度以下、3ヒットイベントでは7%程度以下の精度でシミュレーションにより再現できることを確認でき、天体観測の際に用いる目処が立った。

本研究では50keVの単色光を用いており、更に照射点も定めているため、各ユニットで取得されるスペクトルを予想することが容易である。本試験では、19ユニットプロトタイプ検出器の性能実証および、その応答を正しくシミュレーションによって再現できることを確認することを目標としており、その解析には、取り扱うイベントの統計数を増やし、解釈をし易くするため、上記のようなビームの情報を用いたイベントセレクションを行った。しかし、実際の観測では照射されたエネルギーは単色ではなく、X線の入射位置もわからない。そのため、どのユニットが散乱体・吸収体として機能しているのかの判断には各ユニットで検出されたエネルギーの大きさに頼らざるを得ない。よって一様に入射したX線に対するイベントセレクションを最適化し、またそのセレクションのもとでのエネルギー応答、つまり装置の応答関数を求めることで、2010年の Engineering Flight に向け、迅速な解析を行うために備えることが課題となる。

謝辞

まず、本研究を進めるにあたり、大杉先生、深沢先生には快適に研究活動ができるよう御尽力してくださるだけでなく、就職活動などを始めとする私事についてまでサポートしていただきました。深く感謝致します。また、指導教官である水野先生には本研究のPoGO関連に留まらず、物理学、天文学、コンピュータによる情報処理についてまで、多くの御指導を頂きました。本当にありがとうございました。困った際はいつも快く相談に乗ってくださり、的確なアドバイスをくださったひろたかさん、3年間、本当に御世話になりました。特にスウェーデンへの出張の際には何から何までサポートしていただきました。片桐先生には、もう一つの研究課題であったフェルミ衛星について、多くのことを教えていただきました。またそれとともに、計算機関連でいつも何かと御世話になりました。感謝致します。山下先生、植村先生、川端先生にはコロキウムや学会等の発表練習の際、いつもの的確な指摘、アドバイスを頂き、誠にありがとうございました。

また本研究を行うにあたって、他大学の方々にも御協力を頂きました。小賀坂先生を始めとする、名古屋大U研X線グループの方々や、ISAS/JAXAの勝田さんには、SPring-8実験の時は御世話になりました。SLACの田島先生、東京工業大学河合研究室の片岡先生、植野さん、栗田くん、金井さん、有元さんにはKEK試験や学会等を通して、多くのサポートをしていただきました。みなさまに深く感謝致します。

また卒業していった先輩方を含め、研究室の皆様には公私共々本当に御世話になりました。同期のメンバーには特に恵まれ、限りある時間の中で支えあい、お互いを啓発しあい、とても大事な時間を共に過ごすことができたと感じています。中でも、学部生の頃から仲良くしてもらっている上原君、田中君には研究面だけでなく、生活面や私情についても多くの相談に乗ってもらい、いくら感謝してもしきれません。本当にありがとうございました。

この3年間の研究生活を支えてくださった、研究室の皆様には、心からお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] T. Kamae et al. 'PoGOLite - A high sensitivity balloon-borne soft gamma-ray polarimeter' 2008
- [2] Y. Kanai et al. 'Beam test of a prototype phoswich detector assembly for the PoGOLite astronomical soft gamma-ray polarimeter' 2007
- [3] M. FOROT et al. 'POLARIZATION OF THE CRAB PULSAR AND NEBULA AS OBSERVED BY THE INTEGRAL/IBIS TELESCOPE' 2008
- [4] A. J. Dean et al. 'Polarized Gamma-Ray Emission from the Crab' 2008
- [5] 田中琢也 '衛星搭載機器統一通信規格 SpaceWire を用いた宇宙 X 線・ガンマ線観測用データ収集システムの開発' 2008 広島大学修士論文
- [6] 山本和英 '気球搭載宇宙硬 X 線偏光検出器 PoGOLite の主検出部の開発と性能評価' 2007 広島大学修士論文
- [7] 佐藤悟朗 et al. 'ガンマ線検出用 Schottky CdTe Diode のポラリゼーション効果'
- [8] 佐藤悟朗 '宇宙硬 X 線・ γ 線検出用 CdTe/CdZnTe 半導体検出器の開発と特性評価' 2002 東京大学修士論文
- [9] Y. Kanai 'Performance Evaluation of Phoswich Detector Cell for the Balloon-Borne Astronomical Soft Gamma-Ray Polarimeter PoGOLite' 2007 Master thesis, Tokyo Institute of Technology
- [10] 大野雅功 'Astro-E2 衛星搭載ガンマ線バーストモニタの信号処理回路の開発と応答関数の構築' 2004 広島大学修士論文
- [11] T. Mizuno et al. 'A Monte Carlo method for calculating the energy response of plastic scintillators to polarized photons below 100keV'
- [12] 木村逸郎 阪井英次 'KNOLL 放射線計測ハンドブック 第三版' 2001 日刊工業新聞社
- [13] S. M. Seltzer, M. J. Berger 'Density effect for the ionization loss of charged particles in various substances' 1984
- [14] 松岡正之 '新衛星通信規格 SpaceWire を用いたデータ収集システムの開発' 2008 広島大学卒業論文
- [15] T. Mizuno et al. 'High Sensitivity Balloon-Borne Hard X-Ray/Soft Gamma-ray Polarimeter PoGOLite' 2007 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record
- [16] J.Kataoka et al. 'Low Energy Response of a Prototype Detector Array for the PoGO Astronomical Hard X-ray Polarimeter ' 2005 SPIE