

多層膜スーパーミラーを用いた 硬X線偏光計検出器のデザイン

扇 拓矢

広島大学理学部物理科学科

B044350

高エネルギー宇宙・素粒子実験研究室

2008.02.29

概要

宇宙にはX線やγ線の偏光観測でしか解明できない現象が数多く存在している。例えば、中性子星周りの磁場やブラックホールの降着円盤の構造および、高エネルギー光子の放射機構などがあげられる。本研究では従来考えられてきたコリメータ型の偏光計検出器の技術と硬X線反射望遠鏡を組み合わせることで、広いエネルギー領域に高い感度をもつ次世代型偏光計検出器をデザインする。

硬X線反射望遠鏡は光子の集光を行うので、検出器自体を小形化でき、バックグラウンドを低減することができる。偏光計検出器には、散乱体にプラスチックシンチレータを用いたコンプトン散乱型検出器のデザインを採用した。検出器の構造には様々な形状が考えられるが、本研究では回転対称性のよい六角柱を用いたデザインと、四角柱を並べたデザインを比較検討した。前者は2~3 cm程度の幅のシンチレータを並べ、各々を独立の光電子増倍管で読み出す。シンチレータが太いので、シンチレーション光の高い集光率を実現でき、低いイベント閾値を容易に達成できる。後者は1 cm以下の細かいシンチレータを並べ、位置検出型光電子増倍管で読み出す。散乱角をより細かいピッチで測定できるので、偏光度の小さな信号を検出しやすい。

本研究では検出器のデザインを評価するにあたり、モンテカルロシミュレーションツールとしてGeant4を用いた。まず偏光計に関連する物理プロセスの検証を行い、Geant4が正しく光子の反応を記述できることを確認した。続いて10-100 keVの範囲で単色光を照射し、日本の次期X線衛星NeXT衛星の硬X線望遠鏡の有効面積を仮定して、両デザインの性能を評価した。その結果、両デザインとも従来のコリメータ型検出器に対して、1/10以下のユニット数で同等の性能が確認できた。さらに、検出器のサイズを様々に変化させ、最適なデザインと到達可能な性能を評価した。

目次

第1章	Introduction	7
第2章	硬 X 線偏光観測	8
2.1	偏光とは	8
2.1.1	偏光観測の意義	8
2.1.2	偏光に関連したプロセス	9
2.2	偏光検出器	11
2.2.1	光電効果を利用した検出器	11
2.2.2	コンプトン散乱を利用したもの	12
2.2.3	ブラッグ反射を利用したもの	13
2.2.4	X線望遠鏡	14
第3章	Geant4による偏光検出器に関連したプロセスの検証	17
3.1	Geant4とは	17
3.2	X線の反応断面積	17
3.3	コンプトン散乱の角度分布	20
3.3.1	散乱角	20
3.3.2	方位角分布	23
3.3.3	入射前後の偏光ベクトルの角度分布	23
第4章	偏光検出器のデザイン評価	27
4.1	PoGOLiteの概要と性能	27
4.2	偏光検出器のデザイン候補	29
4.3	光子の収集効率を重視した検出器 (patternA)	30
4.3.1	有効面積の評価	31
4.3.2	モジュレーションファクターの評価	32
4.3.3	検出可能偏光度 (MDP)	32
4.4	角度分解能を重視した検出器 (patternB)	39
4.4.1	有効面積の評価	39
4.4.2	Moduration Factor の評価	39
4.4.3	検出可能偏光度 (MDP)	41
4.5	望遠鏡型偏光計にふさわしいスタイル	45

目 次

2.1	x 軸方向に偏光した X 線を -z 方向から +z 方向に向け入射させた際のコンプトン散乱の図。P 点は散乱後の光子の方向ベクトルを xy 平面に射影した点	9
2.2	-z 軸方向から入射 X 線を入射させた光電効果の図。	10
2.3	ブラッグ反射の概略図	11
2.4	コンプトン散乱型検出器の概要図 ([1] から借用)	13
2.5	ブラッグ反射型偏光検出器の概要図 ([1] より借用)	14
2.6	X 線望遠鏡の概略図。名古屋大学素粒子宇宙物理学 U 研 x 線グループホームページ [2] より借用	15
2.7	全反射、多層膜ミラー、多層膜スーパーミラーの概要図	15
2.8	全反射、多層膜ミラー、多層膜スーパーミラーの性能を比較したグラフ (青; 全反射、緑; 多層膜硬 X 線ミラー、赤; 多層膜スーパーミラー)。[2] より借用。	16
3.1	シンチレータにガンマ線を入射	18
3.2	プラスチックシンチレーターの反応断面積。(σ_{pe} が光電効果、 σ_{cs} がレーリー散乱、 σ_{co} がコンプトン散乱の場合である。Geant4 の値を赤で、NIST の値を黒で示した。)	18
3.3	CsI シンチレーターの反応断面積。(印および色の意味は図 3.2 と同様。)	19
3.4	GSO シンチレーターの反応断面積。(印および色の意味は図 3.2 と同様。)	19
3.5	BGO シンチレーターの反応断面積。(印および色の意味は図 3.2 と同様。)	20
3.6	入射光子をシンチレータで散乱した図。 θ は入射 X 線と散乱 X 線間の角度、 ϕ は入射 X 線の偏光方向と散乱方向の x-y 平面への射影との角度、 Θ は入射光子の偏光ベクトルと散乱光子の偏光ベクトルのなす角度である。	21
3.7	plastic シンチレータにおける Incoherent Scattering Function(SF)。赤は [6] で与えられた計算値、黒は計算値を再現するのに用いた近似式である。	22

3.8	40 keV のエネルギーの光子を plastic シンチレータに 1 M イベント入射したときの散乱角分布。ヒストグラムは Geant4 シミュレーションの結果、実線は式 3.6 の関数である。	22
3.9	40 keV の X 線を plastic シンチレーターで散乱させたときの方位角分布 (黒;0°、赤;45°、緑;90°、青; 135°)	23
3.10	散乱後の偏光ベクトルの散乱角と、方位角の分布。図 2.1 の θ および ϕ と同じ定義を利用した。左上図は前方散乱、右上図は後方散乱のものである。下図は 90 度散乱のものであり、緑が方位角 $\phi = 45^\circ$ 、青が $\phi = 135^\circ$ である。	25
3.11	前方散乱 (左) および後方散乱 (右) における散乱前後の偏光ベクトルのなす角の頻度分布。入射光子のエネルギーは 100 keV である。参考のために偏光光子のコンプトン散乱に関するバグを我々自身で修正する前の分布を紫のヒストグラムで示す (前方散乱のみ)。 . . .	25
4.1	(左) 真上から見た PoGOLite 検出器。X 線光子は偏光ベクトルに対して垂直方向に散乱しやすく、この散乱方位角から偏光方向を測る。(右)PoGOLite 検出器の断面図 ([[10]] より借用)。バックグラウンドおよび偏光イベントの例も図示してある。	28
4.2	PoGOLite 検出器における有効面積 (左図) とモジュレーションファクター (右図)。 [12] より借用。	29
4.3	PoGOLite 検出器における信号強度およびバックグラウンドの評価。 [12] より借用。	30
4.4	左側が Geant4 シミュレーションで実現した patternA の構造。赤が plastic シンチレータ、黄が GSO シンチレータである。ただし、構造が見にくくなるため BGO シンチレータは省いた。右側が Geant4 シミュレーションで実現した patternB の構造。赤が plastic シンチレータ、黄が CsI シンチレータである。こちらも、構造が見にくくなるため BGO シンチレータは省いた。	31
4.5	NeXT 衛星用多層膜スーパーミラーの性能。左図がエネルギーに対する有効面積で、赤と青が多層膜スーパーミラーの値を示し (色は積分領域の違い)、本論文では赤色の有効面積 (25cm × 25cm) を採用した。比較のため、「すざく」衛星の全反射鏡の有効面積を黒で示す。右図は多層膜スーパーミラーのイメージのプロファイル。 . .	32
4.6	長さ 10 cm での patternA 検出器の反応確率 (入射光子 10 万個)。エネルギースレシールドは黒が 0 keV、赤が 2 keV、緑が 3 keV、青が 4 keV、紫が 5 keV を示す。	33

4.7	長さ 10 cm での patternA 検出器と多層膜スーパーミラーを組み合わせた偏光計検出器の有効面積 (入射光子 10 万個)。図 4.6 と同様に、エネルギーシールドは黒が 0 keV、赤が 2 keV、緑が 3 keV、青が 4 keV、紫が 5 keV を示す。	33
4.8	patternA 検出器 を正面から見た構造。赤がプラスチックシンチレータ、黄が GSO シンチレータである。	34
4.9	patternA 検出器におけるエネルギーシールド 2 keV 下で入射光子エネルギー 40 keV のモジュレーションカーブ。青が散乱体と吸収体の距離が長いもの、緑が短い物である。	34
4.10	長さ 10 cm での patternA 検出器におけるモジュレーションファクター。図 4.6 と同様に、エネルギーシールドは黒が 0 keV、赤が 2 keV、緑が 3 keV、青が 4 keV、紫が 5 keV を示す。	35
4.11	patternA 検出器の時間に対する MDP 。青、緑、赤はそれぞれ 10 mCrab の天体、100 mCrab の天体、1 Crab の天体を観測した場合。実線はバックグラウンドを無視した場合で、点線はバックグラウンドを考慮した感度曲線を示す。	37
4.12	patternA 検出器のフラックスに対する MDP 。青、緑、赤はそれぞれ観測時間 10 ks、100ks、1Ms で観測した場合。図 4.11 と同様に、実線はバックグラウンドを無視した場合で、点線はバックグラウンドを考慮した感度曲線を示す。	37
4.13	patternA 検出器のエネルギーシールドに対する 100 mCrab の天体を 20 ks 観測したときを想定した MDP	38
4.14	patternA 検出器の長さ 3 cm から 25cm における MDP	38
4.15	長さ 4 cm での patternB 検出器の反応確率 (入射光子 60 万個)。エネルギーシールドは黒が 0 keV、赤が 2 keV、緑が 3 keV、青が 4 keV、紫が 5 keV を示す。	40
4.16	長さ 4 cm での patternB 検出器と多層膜スーパーミラーを組み合わせた偏光計検出器の有効面積 (入射光子 60 万個)。図 4.15 と同様にエネルギーシールドは黒が 0 keV、赤が 2 keV、緑が 3 keV、青が 4 keV、紫が 5 keV を示す。	40
4.17	エネルギーシールドが 2 keV で、入射光子 40 keV の場合の、CsI シンチレーターの一つのモジュレーションカーブ	41
4.18	長さ 4 cm での patternB 検出器におけるモジュレーションファクター。図 4.15 と同様、エネルギーシールドは黒が 0 keV、赤が 2 keV、緑が 3 keV、青が 4 keV、紫が 5 keV を示す。	42
4.19	patrenB 検出器の時間に対する MDP 。青、緑、赤はそれぞれ 10 mCrab の天体、100 mCrab の天体、1 Crab の天体を観測した場合。実線はバックグラウンドを無視した場合で、点線はバックグラウンドを考慮した感度曲線を示す。	43

4.20	patternB 検出器のフラックスに対する MDP 。青、緑、赤はそれぞれ観測時間 10 ks、100ks、1Ms で観測した場合。図 4.19 と同様に、実線はバックグラウンドを無視した場合で、点線はバックグラウンドを考慮した感度曲線を示す。	44
4.21	patternB 検出器のエネルギーレスショルドに対する 100 mCrab の天体を 20 ks 観測したときを想定した MDP	44
4.22	patternB 検出器の長さ 2 cm から 6 cm における MDP	45

第1章 Introduction

宇宙では、私達の日常から掛け離れた現象が起こっており、天体から降り注ぐ電磁波を観測することで、これらを解明することができる。電磁波を観測する方法に、天体の像を得る撮像、天体の光度を測る測光、波長を細かく分けてスペクトルを取る分光、電場ベクトルの方向の偏りを調べる偏光の4つの方法がある。電磁波は電波を初め、可視光、紫外線、X線などと波長領域で分けられている。その中で、X線やγ線領域においては撮像、測光、分光の3つの方法で観測が行われてきたが、偏光は観測が難しく、これまでほとんど行われていない。現在までに観測されたX線領域の偏光は、太陽観測衛星OSO-8(1975-76)による軟X線領域でのカニ星雲の観測だけである。しかし、シンクロトロン放射やコンプトン散乱が絡む天体における、磁場や降着円盤の構造、放射機構など、X線偏光で初めて解明できる現象が数多く存在し、本格的なX線偏光観測の進展が望まれている。

この状況を打破するために、2010年の気球による偏光観測を目指し天体硬X線偏光検出器PoGOLiteが広島大学を含む国際協力で開発されている。PoGOLiteは、コンプトン散乱の異方性を利用した偏光器であり、217ユニットの井戸型phoswichカウンタで構成され、大面積(約200 cm²)と低バックグラウンドを実現し、10あまりの天体の偏光観測を目指している。PoGOLiteの感度は100 mCrab程度であり、これはコリメータを用いた検出器の限界である。このコリメータ型検出器の限界を超える有効な手段と考えられているのが、硬X線反射望遠鏡との組み合わせである。これより感度を10 mCrabレベルにまで下げ、観測可能天体を一気に100あまりにまで増やすことが期待されている。

本研究では多層膜スーパーミラーを用いた硬X線望遠鏡とPoGOLiteの技術、または山形大学等を中心に開発されているPHENEX偏光計の技術を合わせることで、硬X線領域の広いエネルギー範囲に高い感度をもつ次世代偏光観測装置をデザインした。具体的にはモンテカルロシミュレーションを用い、検出器のデザインの最適化を図るとともにその性能を評価した。

第2章 硬X線偏光観測

2.1 偏光とは

偏光とは電場ベクトルと磁場ベクトルの振動方向に規則性のある光のことであり、その電場ベクトルの軌跡の形により直線偏光、円偏光、楕円偏光に分けられる。ベクトルが電磁波の伝播にともなって円や楕円を描くものを円偏光、楕円偏光と呼び、ベクトルの向きが一定であるものを直線偏光と呼ぶ。光の偏光方向の強度を N_{\parallel} 、それに垂直な方向の強度を N_{\perp} とすると、直線偏光の偏光度 P は以下のように定義される。

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

$P = 1$ のときを完全偏光、 $P = 0$ のときを無偏光とよぶ。

2.1.1 偏光観測の意義

天体からの放射のうち、熱平衡に達していない系からの放射を非熱的放射と呼び、シンクロトロン放射やコンプトン散乱などがある。これらのいずれからも強い偏光が生み出されるため、偏光観測により系の構造や、放射機構を解明することができる。以下に3つの例をあげる。

1つ目は高速回転する強磁場中性子からの周期的なX線放射(パルサー)である。エネルギースペクトルはシンクロトロン放射で表され、パルサー磁気圏中で加速された相対論的粒子からの放射と考えられるが、粒子加速がどこで起こっているのか分かっていない。偏光観測はパルサーの高エネルギー放射モデルの議論に決着をつける切札となる。

2つ目はブラックホール連星系やセイファート銀河の中心に位置するブラックホール周辺に存在する降着円盤からの放射である。降着円盤とは、大量のガスや塵などがブラックホールや中性子星のようなコンパクト天体に重力によって落下する際に、天体の周りに形成される円盤である。軟X線では円盤自身の熱放射が見える一方、硬X線では円盤によるコンプトン反射成分が強いと考えられている。よって偏光観測を用いることで、降着円盤の存在を実証し、またその幾何学構造を調べることができる。

3つ目は超新星残骸であり、超新星爆発に伴う粒子加速がおき、宇宙線の起源であると考えられている。実際、エネルギースペクトルは粒子が磁場で曲がる際に

生じるシンクロトロン放射の形をしている。よって高感度X線偏光観測により、超新星残骸付近の磁場の構造や加速された粒子の分布を調べることができると期待されている。

2.1.2 偏光に関連したプロセス

コンプトン散乱

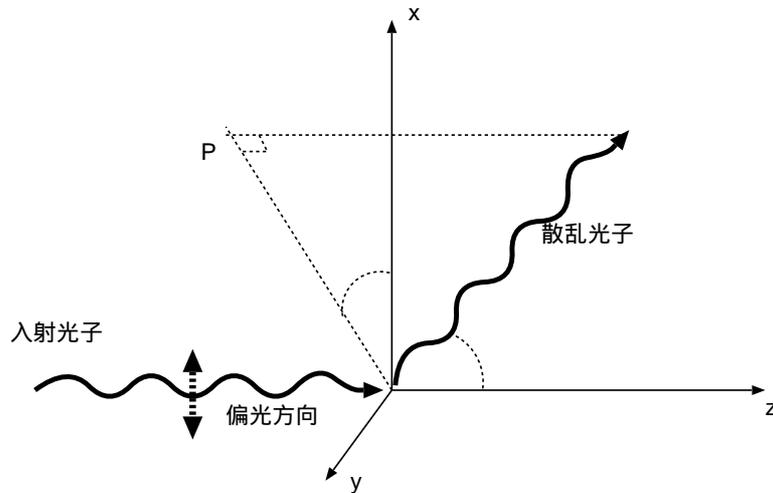


図 2.1: x 軸方向に偏光した X 線を -z 方向から +z 方向に向け入射させた際のコンプトン散乱の図。P 点は散乱後の光子の方向ベクトルを xy 平面に射影した点

コンプトン散乱とは光子と電子との衝突により、光子のエネルギーの一部を電子に与え、光子のエネルギーが変化するものである。このような反応を非弾性散乱と言う。それに対し、電子と衝突する際に光子のエネルギーは変わらず進行方向のみが変わる反応(弾性散乱)を、トムソン散乱と言う。散乱 X 線のエネルギーと散乱角の関係式は、図 2.1 のように入射前後のエネルギーをそれぞれ E_0, E 、角度を θ 、 ϕ (θ は入射 X 線と散乱 X 線の間角度、 ϕ は入射 X 線の偏光方向と、散乱方向の x-y 平面への射影との角度) とおくと

$$E = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{mc^2} (1 - \cos \theta)} \quad (2.2)$$

と表せられる。ただし、 mc^2 は電子の静止エネルギー (511 keV) である。光子と自由電子の間のコンプトン散乱の微分散乱断面積は Klein-Nishina の式により表される。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_0^2 E^2}{2 E_0^2} \left[\frac{E_0}{E} + \frac{E}{E_0} - 2 \sin^2 \theta \cos^2 \phi \right] \quad (2.3)$$

ここで、 r_0 は電子の古典半径 (2.818×10^{-15} m) である。この式より、 ϕ が 90° 、 270° のときに散乱確率が大きくなり、 ϕ が 0° 、 180° のときには小さくなること
 がわかる。このことは、散乱 X 線は入射 X 線の電場ベクトル (偏光方向) に対して
 垂直方向に散乱されやすいことを示しており、この原理を用いて偏光を測ること
 ができる。

光電効果

19 世紀後半に発見された現象で、原子に束縛された電子に光子が当たると電子
 が光子の全エネルギーを受け取り、光電子として原子から飛び出す現象である。あ
 る程度の高いエネルギーを持った X 線は電子の中でもっとも強く結合している K
 殻電子を光電子として放出する割合が大きい。原子中から電子が 1 つなくなるの
 で、1 つの空孔ができる。この空孔は自由電子の捕獲や原子内の他の殻の電子の再
 配列によって直ちに満たされる。このとき、蛍光 X 線も発生する。入射 X 線のエ
 ネルギーが静止質量 (511 keV) に対して小さい場合の微分散乱断面積は次のよう
 に表される。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = r_0^2 \frac{Z^5}{137^4} \left(\frac{\mu}{E_0} \right)^{\frac{7}{2}} \frac{4\sqrt{2} \sin^2 \theta \cos^2 \phi}{(1 - \beta \cos \theta)} \quad (2.4)$$

ここで、 Z は原子番号、 μ は電子の静止質量を表し、 $\beta = v/c$ (v は速度、 c は光速)
 である。また、図 2.2 で表されるように、 θ は電子の方向と z 軸とのなす角、 ϕ は電
 子の方向のベクトルの x - y 平面への射影と x 軸とのなす角である。この式により、
 光電効果によって、放出される K 殻の電子は入射 X 線の電場ベクトル (偏光方向)
 に対して平行に飛びやすいことが分かる。この原理は主に、10 keV 以下の軟 X 線
 領域での偏光観測に用いられている。

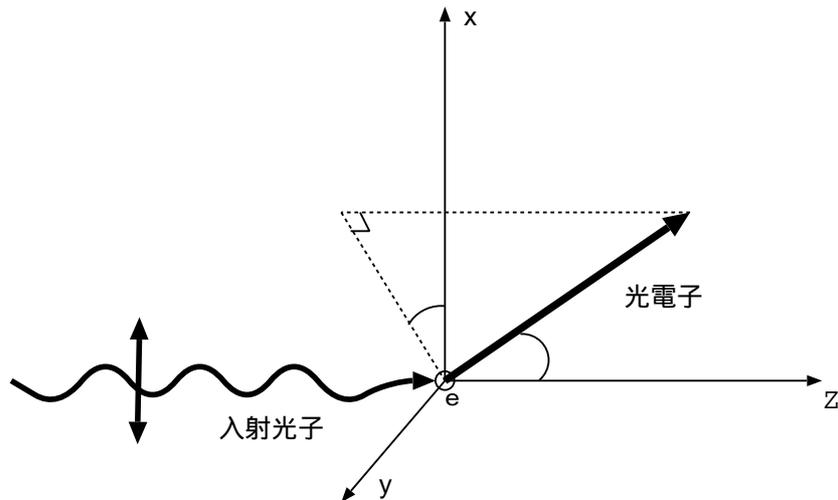


図 2.2: $-z$ 軸方向から入射 X 線を入射させた光電効果の図。

ブラッグ反射

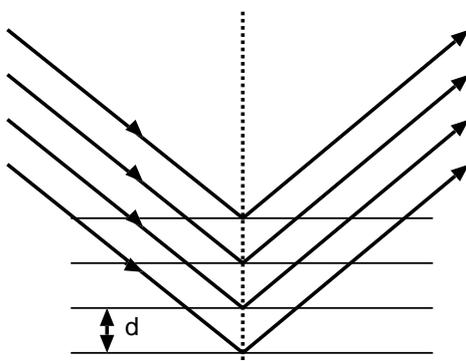


図 2.3: ブラッグ反射の概略図

規則的な周期で並んだ結晶面の間での干渉で強めあうことによる反射のことで、2.2.4 で述べる硬 X 線望遠鏡はこの原理を用いている。図 2.3 は結晶構造を示し、 d を結晶の格子定数、 θ を電磁波の入射角、 λ を波長とすると、回折条件で与えられる X 線の結晶格子による反射の条件式は

$$2d \sin \theta = m\lambda \quad (2.5)$$

となる (m は整数)。連続 X 線が入射すると、 θ に依存した特定のエネルギーの X 線を取り出すことが可能となる。反射面に対して平行な偏光と垂直な偏光の反射率が異なることを利用し、偏光計に用いられる。実際、カニ星雲の偏光 X 線を観測した OSO-8 はブラッグ反射型偏光計であった。

シンクロトロン放射

相対論的な速度で移動する電子が磁場によって曲げられたときに軌道の接線方向に光子が放出される放射のことである。X 線から赤外線に及ぶ広い領域で連続なスペクトルを持ち、放射光としても応用されている。この放射は電子の軌道面内では直線偏光であり、電場ベクトルが軌道面と平行である。電波、可視の偏光観測ではシンクロトロン放射は広く見られている。

2.2 偏光検出器

2.2.1 光電効果を利用した検出器

光電効果を利用した偏光検出器にはガス検出器や CCD 検出器などがある。

ガス検出器

ガス検出器とは、希ガスを容器に封入し、その中に陽極と陰極を設け、電極間に電圧をかけたものである。入射 X 線は希ガスと光電効果を起こす。そこで発生した光電子は周りのガスを次々に電離させながら電子-イオン対の雲を希ガス中に形成させる。光電子は入射 X 線の偏光方向に飛びやすいので、この電子-イオン対の雲は偏光ベクトル方向に伸びた形となる。この雲は陽極に引きよせられるので、電極をピクセル化し電子雲のイメージを得ることで入射 X 線の偏光方向が測定できる。

CCD 検出器

CCD 検出器とは半導体検出器の一種で、シリコン (Si) をピクセル化し並べたものである。入射光子があるピクセルに入射すると、光電効果を起こし、光電子が飛び出す。ガス検出器と同様に、その光電子がシリコンを次々に電離して電子雲を作り出す。光電子がピクセルをふたつ以上跨いだ場合、光電子の飛び出した方向を検出できるので、偏光方向を測ることができる。

2.2.2 コンプトン散乱を利用したもの

コンプトン散乱型偏光計はコンプトン散乱と光電効果を利用した検出器である。図 2.4 はその概要図であり、中心の散乱体に入射光子をあてると、コンプトン散乱され、回りの吸収体で光電吸収をする構造をとる。コンプトン散乱の散乱微分断面積 (式 2.3) により光子は入射光子の電場ベクトル (偏光方向) に対して垂直に散乱されやすいので、散乱角に対する強度変化により偏光を検出する仕組みである。

コンプトン散乱の散乱微分断面積は原子番号 Z の 1 乗に比例し、光電効果のそれは原子番号 Z の 4~5 乗に比例する。つまり、 Z の大きい物ほど光電吸収の割合が増える。このことから、散乱体は Z の低いものを利用し、吸収体は Z が大きいものを利用することが多い。

コンプトン散乱型偏光計検出器の能力を表すひとつの指標にモジュレーションファクター (Modulation Factor) というものがある。モジュレーションファクター (MF) は 100 % 偏光した入射光子を検出器に入射したとき、ある方位角方向に散乱した散乱光子のカウントレートを N とすると次式のように表される。

$$MF \equiv \frac{N_{\max} - N_{\min}}{N_{\max} + N_{\min}} \quad (2.6)$$

ここで、 N_{\max} はある方位角に対してのカウントレート N の最大値、 N_{\min} は N の最小値である。これは式 2.1 の偏光度の式で光の強度の代わりに検出器で検出されたイベント数をもちいた式となっている。モジュレーションファクターは完全偏光した入射光の偏光由来のコンプトン散乱の異方性が検出器により、ぼかされて

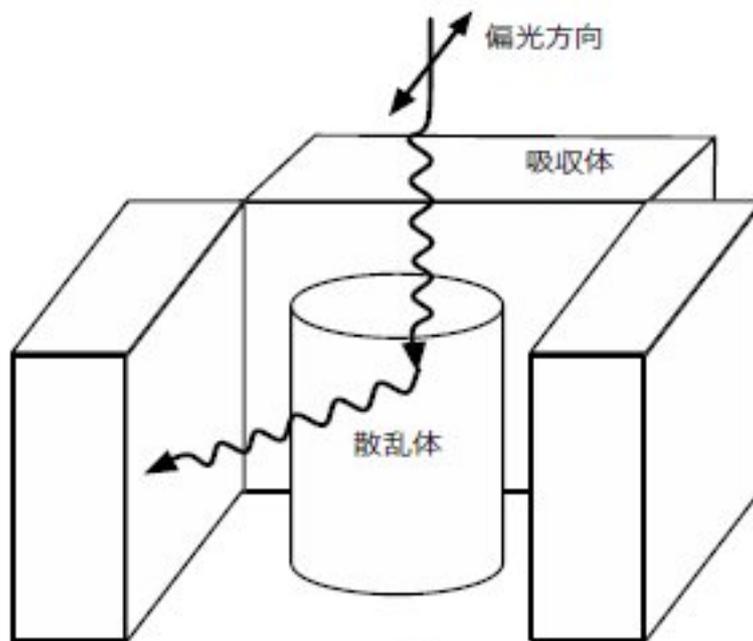


図 2.4: コンプトン散乱型検出器の概要図 ([1] から借用)

いない度合を示すもので、異方性が保たれるほど MF は 1 に近くなり、偏光の度合が保たれていることを意味する。逆に、 MF が 0 に近づくときは偏光の度合が保たれてはおらず、偏光計検出器には適さないことを意味する。

2.2.3 ブラッグ反射を利用したもの

ブラッグ反射型偏光計検出器は入射光子の偏光ベクトルが反射面に対して垂直な場合と平行な場合で反射率が違うことを用いて偏光を検出するものである。ここで θ を入射光子の方向ベクトルと反射面の法線のなす角とすると、 $\theta=45^\circ$ のときにもっとも反射率の違いが大きくなり、偏光に対する感度が高くなる。図 2.5 はブラッグ反射型検出器の概要図である。入射角が 45° になるように結晶を設計すると、偏光方向が反射面に対して垂直のとき反射されず、偏光方向が反射面に対して平行のとき結晶で反射される。そこで、検出器全体を回転させて、反射した X 線の回転方向の分布を測ることで偏光ベクトルの向きと強さが分かる。この検出器はブラッグ条件にあうエネルギーを持った X 線しか偏光を観測できないというデメリットがある。

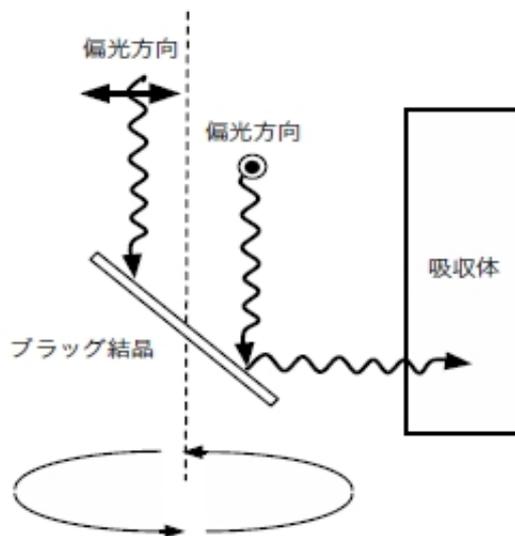


図 2.5: ブラッグ反射型偏光検出器の概要図 ([1] より借用)

2.2.4 X線望遠鏡

全反射型 X線望遠鏡

X線反射望遠鏡の歴史は1978年のEinstein衛星を起源とする。これによりX線撮像が初めて可能となり、X線天文学は大きく進展した。

X線のような高エネルギーの光子はたいていの金属やガラスを透過してしまい、光学望遠鏡と同様の素材で反射望遠鏡を作ることが不可能である。そこで、X線望遠鏡では、重金属でリング状の回転放物面の鏡を作り、X線を鏡面にほぼ平行な方向(1度以下)から入射させることで全反射させて像を結ばせている。図2.6に示すようにわずかに絞られた口径数十cmの円錐の内面で反射させ、数m先の焦点面に像を結ぶ斜入射光学系を利用している。従って、大きな有効面積を得るためには、円錐を多数、同心円に重ねる必要がある。全反射型X線望遠鏡は10 keV以下しか感度を持たないため、大きなX線偏光が期待される非熱的現象の研究には残念ながら向いていない。

多層膜スーパーミラー

10 keV以上の光子を集光させるにはブラッグ反射を用いることができる。ブラッグ反射の条件(式2.5)より、短い周期をもつ膜を重ねることで、10 keV以上の高エネルギーに対して反射率をもたせ、反射鏡として用いることができる。これを

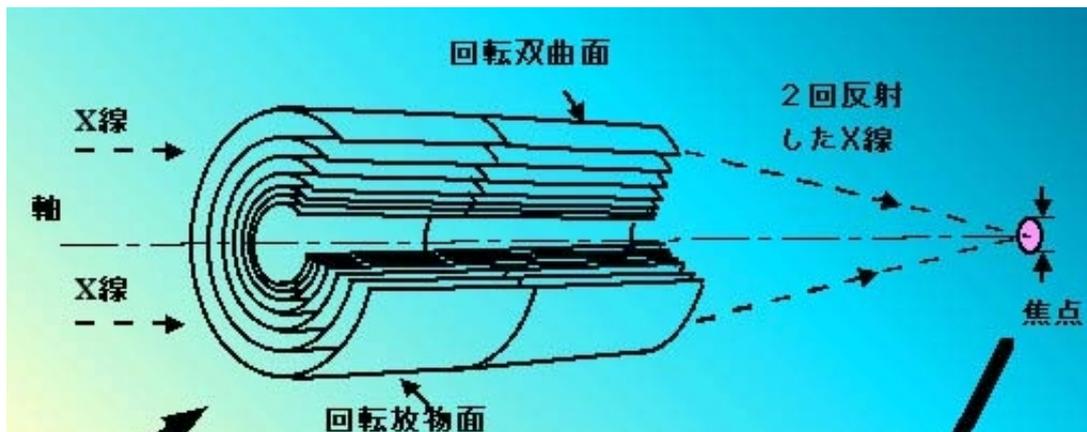


図 2.6: X線望遠鏡の概略図。名古屋大学素粒子宇宙物理学 U 研 x 線グループホームページ [2] より借用

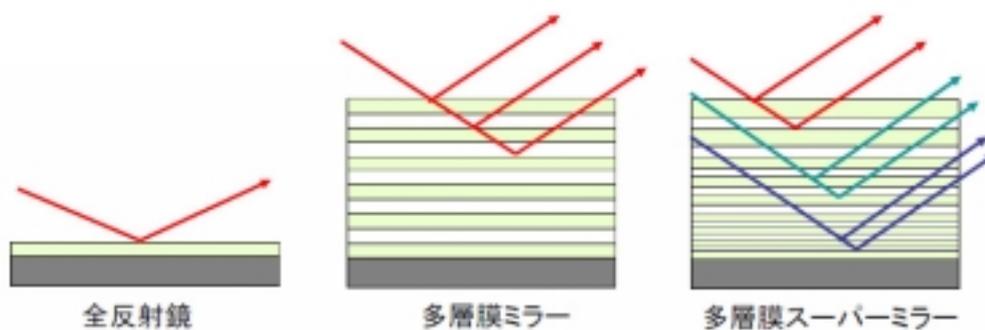


図 2.7: 全反射、多層膜ミラー、多層膜スーパーミラーの概要図

多層膜硬X線ミラーと呼ぶ。このままでは単一のエネルギーの光しか集めることができないので、厚みを順次変えることで広いエネルギーに対し反射率をもたせたものが多層膜スーパーミラーである (図 2.7 および図 2.8)。この多層膜スーパーミラーを用いて、10 keV 以上での撮像を行う計画が日本の次期X線衛星 NeXT である。本研究ではこの多層膜スーパーミラーをX線偏光観測に応用した際の装置の性能評価、デザインの最適化を図る。

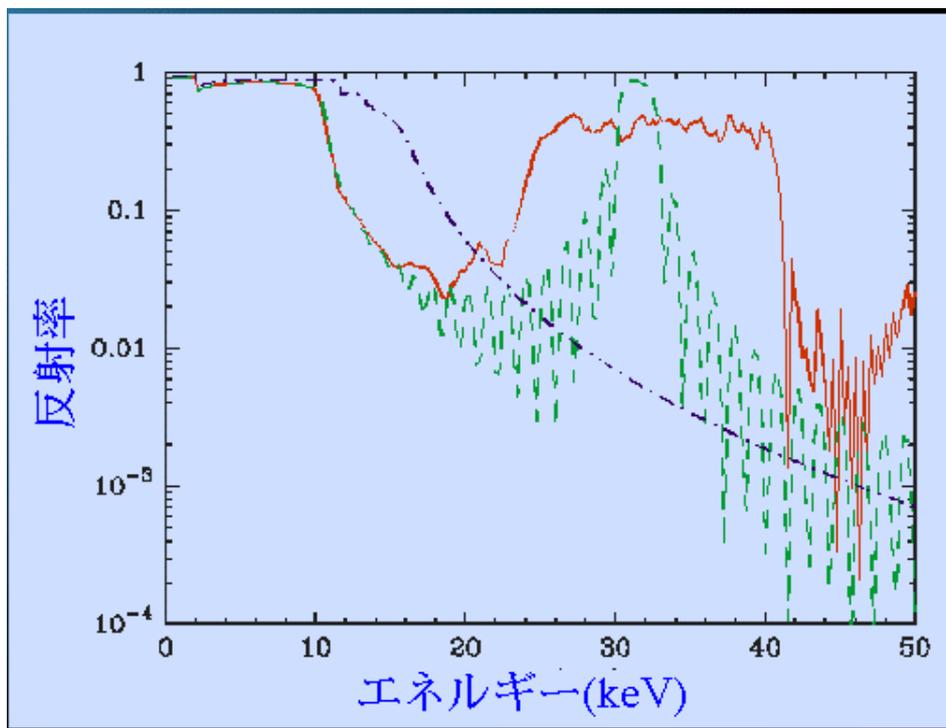


図 2.8: 全反射、多層膜ミラー、多層膜スーパーミラーの性能を比較したグラフ (青; 全反射、緑; 多層膜硬X線ミラー、赤; 多層膜スーパーミラー)。[2] より借用。

第3章 Geant4による偏光検出器に 関連したプロセスの検証

3.1 Geant4とは

Geant4とは、陽子、電子、光子などの粒子と物質との間で起こる様々な物理素過程をシミュレートできるモンテカルロ計算プログラムである。元々は高エネルギー粒子検出器を作る際に装置をシミュレートする目的で開発された。現在では高エネルギー、原子核実験を始めとして、宇宙関連分野、医学応用分野などで利用されている。モンテカルロシミュレーションコードにはEGS4をはじめ、多数のコードが存在するが、Geant4は検出器構造の記述能力に優れ、また、ユーザーがシミュレーションコードの一部(物理プロセスなど)を独自に変更することが可能である。実際に宇宙線衛星GLASTや天体硬X線偏光計PoGO Liteなどで採用されている。そこで、本研究でもGeant4をシミュレーションツールとして用いることにした。なお、Geant4パッケージ中の偏光光子のコンプトン散乱は散乱後の偏光ベクトルが正しくないというバグがあることが分かっている[3][4]。本研究では、このバグを我々自身で直したものをを用いた。

Geant4を偏光検出器のデザインに用いる前に、関連する物理プロセスが正しく実装されているか確認する必要がある。そこで、本章ではGeant4を用いて実際に偏光検出器を形成する物質に対してX線を入射し、その反応断面積や散乱の角度依存性を理論値と比較する。

3.2 X線の反応断面積

今回デザインする偏光検出器はコンプトン型偏光検出器のスタイルを参考とする。散乱体にはplasticシンチレータを、吸収体にはGSOやCsIシンチレータを用い、バックグラウンドの除去にBGOシンチレータを用いる。

これらの検出器に使用するシンチレータの反応断面積を評価をするために、図3.2に示すようにGeant4内に薄いシンチレータの板を作成した。偏光は非熱的放射に伴い生じるので、偏光観測を念頭に、この板に10 keV ~ 100 keVのガンマ線を入射する。Geant4は入射したイベント数に対してどのような反応が何イベント起こったかを出力する。ここで、ガンマ線が物質と反応する確率は、 ρ を物質の密度、 d を厚さ、 σ を反応断面積とすると

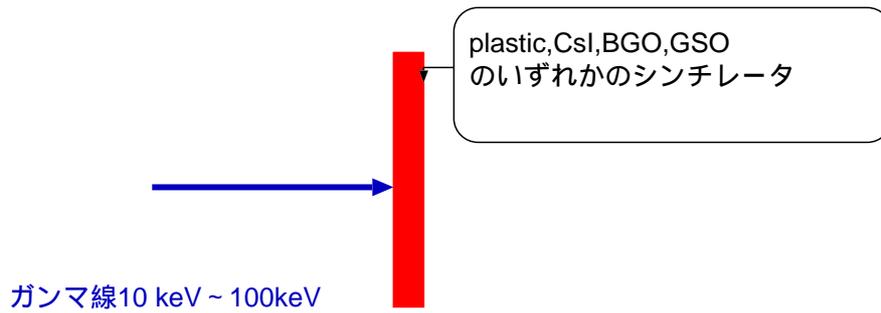


図 3.1: シンチレータにガンマ線を入射

$$1 - \exp(-\rho\sigma d) \quad (3.1)$$

と表されるので、シミュレーションの反応確率から反応断面積 σ を求めることができる。ここで求めた値を NIST(National Institute of Standards and Technology,[5]) が提供する理論値と比較することで Geant4 の物理素過程が正しいか判断する。

Geant4 を用いて、表面積 1 cm^2 で、厚みを plastic は 0.05 cm 、CsI、GSO と BGO は 0.0005 cm の薄い板を作成し、その板に 100 万発の 線を入射した。

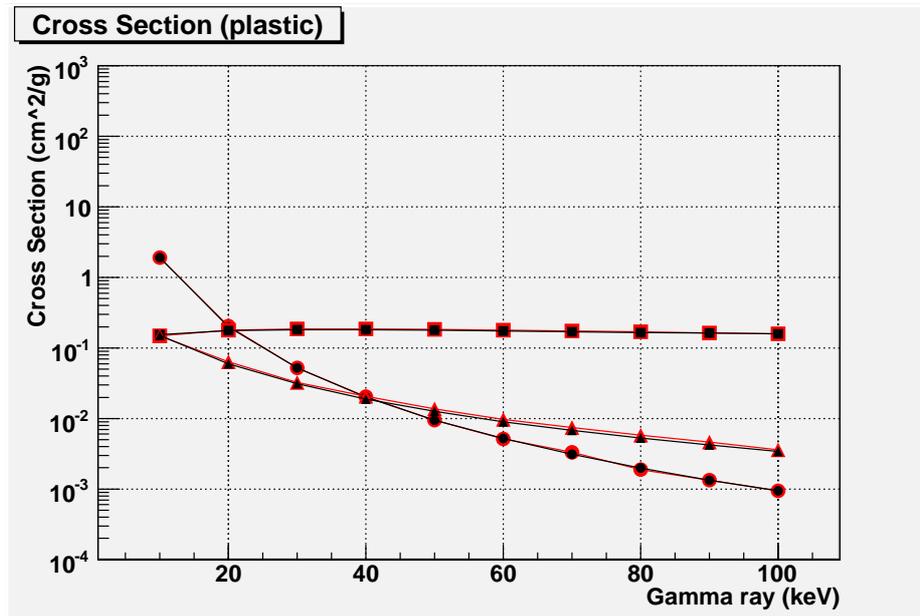


図 3.2: プラスティックシンチレータの反応断面積。(が光電効果、 がレーリー散乱、 がコンプトン散乱の場合である。Geant4 の値を赤で、NIST の値を黒で示した。)

これらの反応断面積を調べた結果を図 3.2, 図 3.3, 図 3.4 図 3.5 にまとめる。ここ

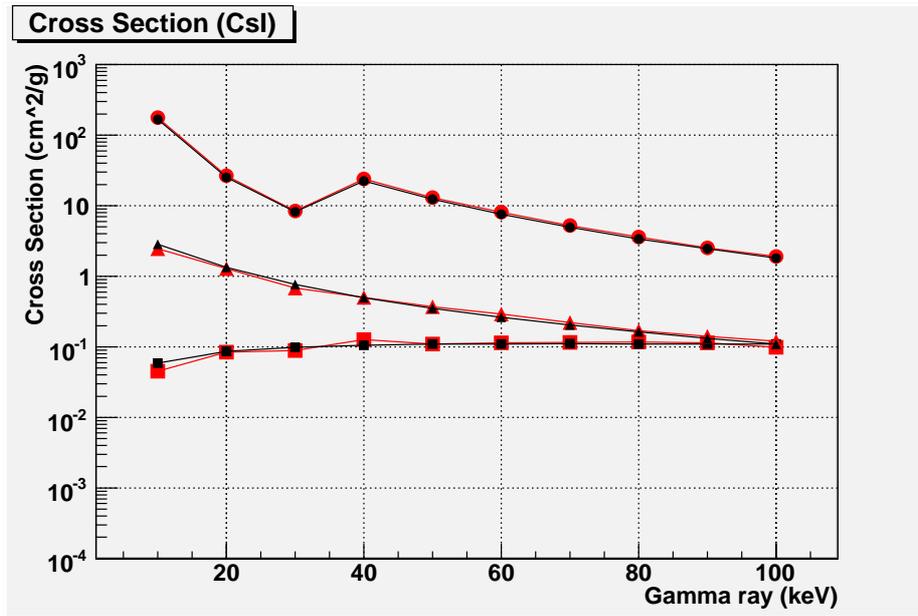


図 3.3: CsI シンチレーターの反応断面積。(印および色の意味は図 3.2 と同様。)

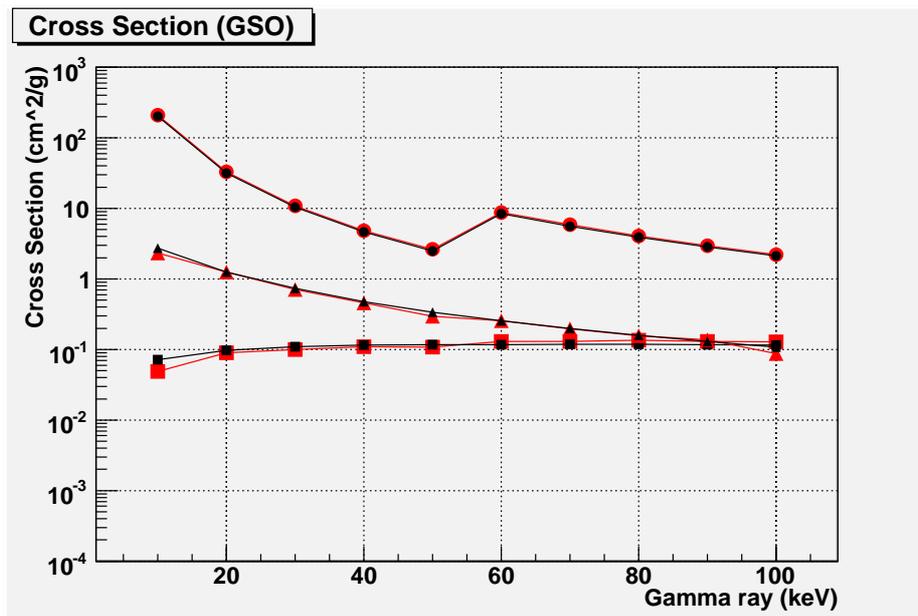


図 3.4: GSO シンチレーターの反応断面積。(印および色の意味は図 3.2 と同様。)

から、10~100 keV の範囲で、NIST の理論値と Geant4 の値が一致しており、反応断面積は正しいことが分かる。

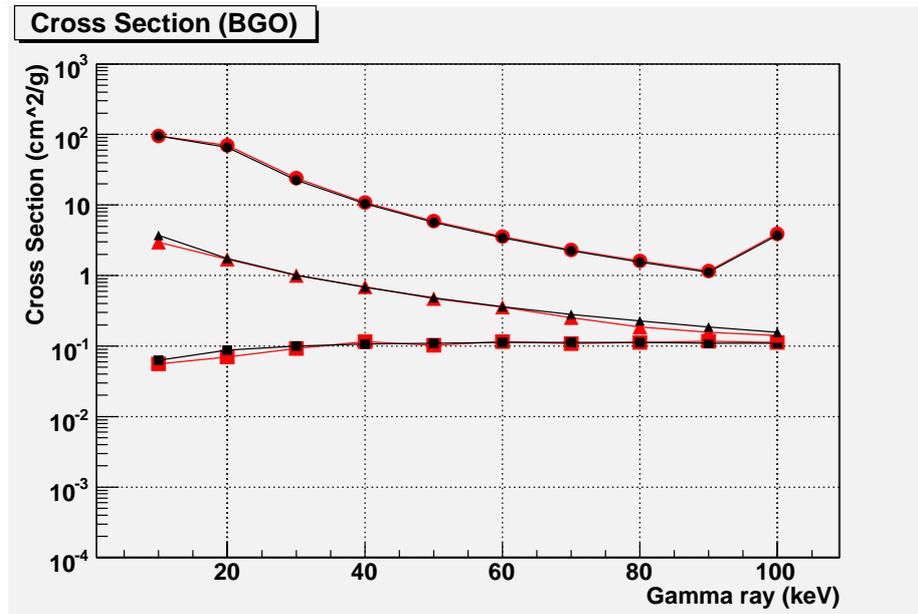


図 3.5: BGO シンチレーターの反応断面積。(印および色の意味は図 3.2 と同様。)

3.3 コンプトン散乱の角度分布

光子の散乱方向が実際の物理過程と異なっている場合は、正しく装置の応答をシミュレートできない。そこでこの節では角度依存が理論値と一致しているのかを確認する。前節と同様に入射光子のエネルギーを 10 keV から 100 keV まで変化させシミュレーションを行った。また、散乱角 θ 、方位角 ϕ 、偏光ベクトルの角度分布 Θ は図 3.6 のように定義した。

3.3.1 散乱角

散乱角 θ は入射 X 線と散乱 X 線との間の角度であり、その確立分布は Klein-Nishina の式とコンプトン散乱前後の光子のエネルギーの式 (式 2.2 および式 2.3) から求めることができる。まず、Klein-Nishina の式を方位角 ϕ に関して積分すると

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_0^2 E^2}{2 E_0^2} \left[\frac{E_0}{E} + \frac{E}{E_0} - \sin^2 \theta \right] \quad (3.2)$$

となる。さらに、コンプトン散乱前後の光子のエネルギーの式 2.2 を代入して

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = Zr_0^2 \left[\frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)} \right]^2 \left[\frac{1 + \cos^2 \theta}{2} \right] \left[1 + \frac{\alpha^2(1 - \cos \theta)^2}{(1 + \cos^2 \theta)[1 + \alpha(1 - \cos \theta)]} \right] \quad (3.3)$$

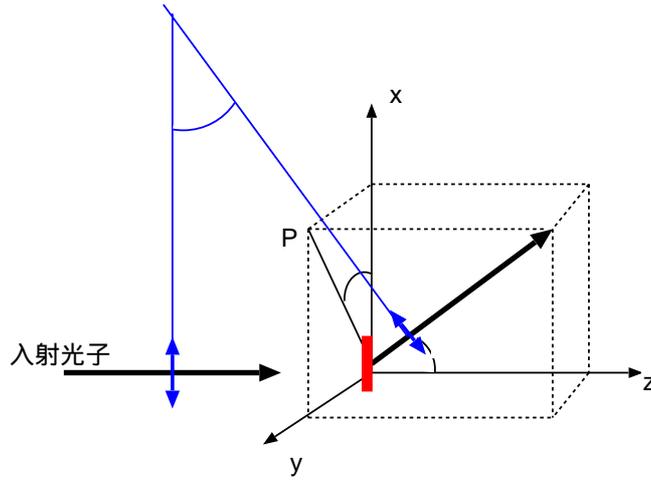


図 3.6: 入射光子をシンチレータで散乱した図。 θ は入射 X 線と散乱 X 線との間の角度、 ϕ は入射 X 線の偏光方向と散乱方向の x - y 平面への射影との角度、 Θ は入射光子の偏光ベクトルと散乱光子の偏光ベクトルのなす角度である。

となる。ここで、 Z は比例定数であり、 α は E/mc^2 を表す。これが自由電子の場合の θ 分布を与える。実際の物質中では原子の中の他の電子の寄与による補正項をかける必要があり、これは Incoherent Scattering Function (SF) などと呼ばれ、量子力学を用いて計算される。プラスチックシンチレータ (C および H で構成される) の場合は Z の大きい炭素 C で代表させることができる。そこで、補正項 SF として [6] に与えられている値を

$$SF = 6 \left[1 - \left(\frac{1}{1 + 35.3x^2} \right)^{0.63} \right] \quad (3.4)$$

$$x = \frac{\sin \frac{\theta}{2}}{\lambda} (\lambda = E/hc) \quad (3.5)$$

で近似した (図 3.7)。ここで、 E は入射エネルギーであり、 c は光速、 h はプランク定数を表す。式 3.3 および式 3.4 から散乱角分布の理論式は

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto SF \quad (3.6)$$

と表される。硬 X 線偏光観測の典型的な例として、40 keV の X 線を plastic シンチレータで散乱させた場合を Geant4 で実現させ、その角度分布の上にこの式をスケールさせて重ね書きしたものを図 3.8 に示す。理論式と Geant4 の分布はよく一致しており、散乱角についても正しくシミュレーションされていることが分かる。

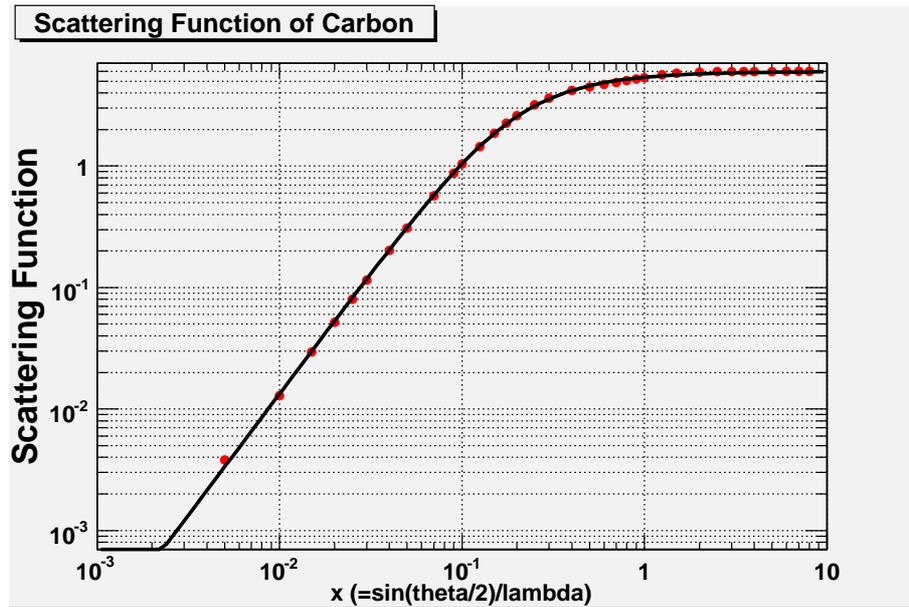


図 3.7: plastic シンチレータにおける Incoherent Scattering Function(SF)。赤は [6] で与えられた計算値、黒は計算値を再現するのに用いた近似式である。

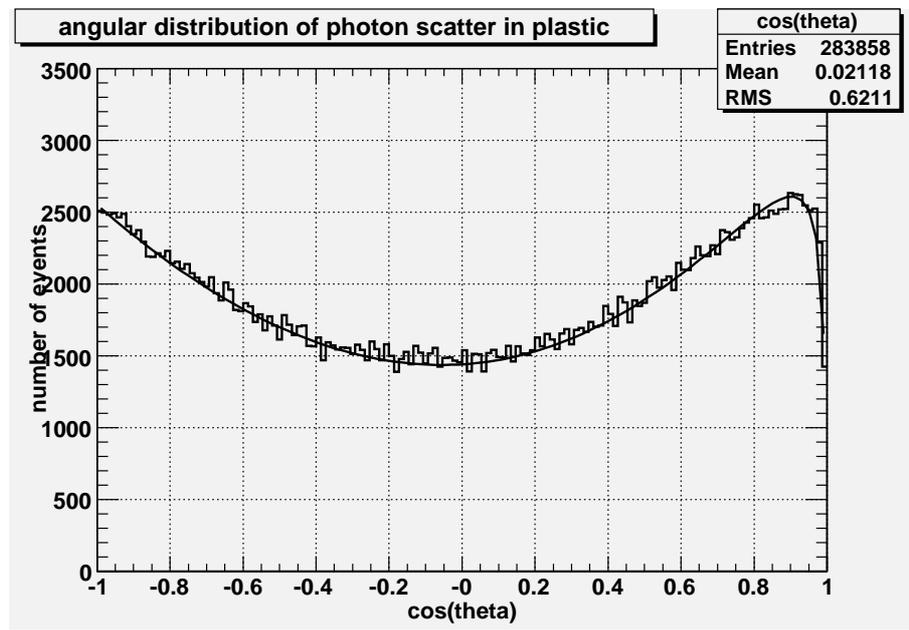


図 3.8: 40 keV のエネルギーの光子を plastic シンチレータに 1 M イベント入射したときの散乱角分布。ヒストグラムは Geant4 シミュレーションの結果、実線は式 3.6 の関数である。

3.3.2 方位角分布

方位角 ϕ は入射 X 線の偏光方向と、散乱方向の x-y 平面への射影との角度である。散乱断面積の方位角 ϕ に対する依存性は式 2.3 で表され、 $\phi = 0^\circ$ 、 180° で確率が最小、 $\phi = 90^\circ$ 、 270° で最大になることと、この依存性は $\theta = 90^\circ$ で一番大きいことがわかる。式 2.2 を用いて、散乱後のエネルギー E を消去すると

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = Zr_0^2 \left[\frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right]^2 \left[2 + \frac{\alpha^2(1 - \cos\theta)}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} - \sin^2\theta(1 + \cos 2\phi) \right] \quad (3.7)$$

と表せる。方位角の異方性が一番小さい $\theta = 0^\circ$ の場合、一番大きい $\theta = 90^\circ$ の場

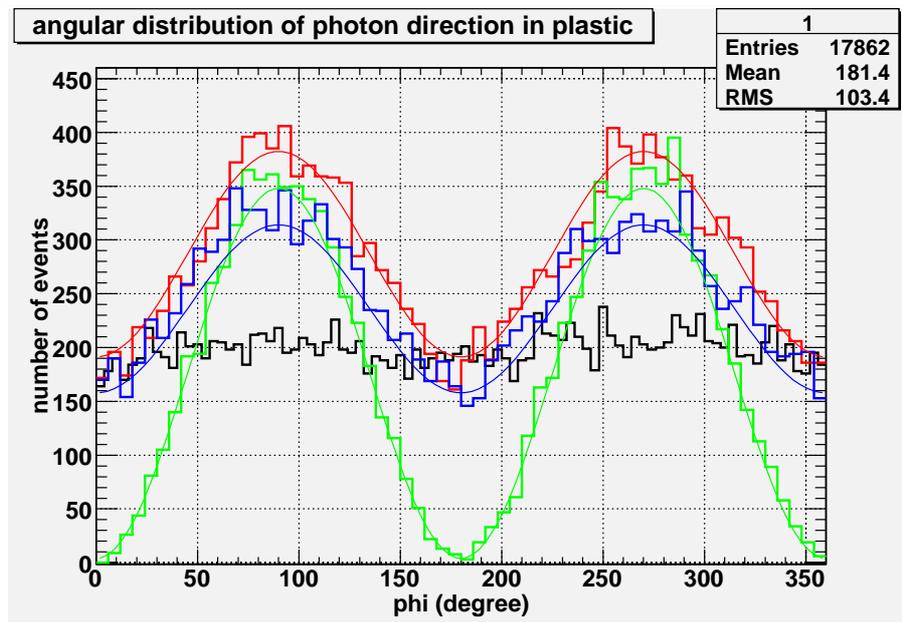


図 3.9: 40 keV の X 線を plastic シンチレーターで散乱させたときの方位角分布 (黒; 0° 、赤; 45° 、緑; 90° 、青; 135°)

合と、両者の中間として $\theta = 45^\circ$ 、 $\theta = 135^\circ$ の場合について、やはり、40 keV の X 線における分布を Geant4 と理論式を比べたのが、図 3.9 である。両者は一致しているといってよく、方位角分布も正しくシミュレーションできていることが分かった。

3.3.3 入射前後の偏光ベクトルの角度分布

散乱体の体積が無限に小さい理想的な偏光計では、散乱角分布と方位角分布が正しくシミュレーションできているなら、装置で起こる反応を追うことができる。しかし、実際の装置は有限の大きさを持つため、散乱体内での複数回の散乱が無

視できない。よって、散乱角と方位角に加えて、「散乱後の偏光ベクトルの向き」も正しくシミュレーター上で実装されているか確認する必要がある。そこで、入射光子の偏光方向と、散乱光子の偏光方向のなす角 Θ の分布が正しいかの検証を行った。

[7]によると、微分散乱断面積(式 2.3)は、散乱後の偏光ベクトルが、入射光子の方向ベクトルと、その偏光ベクトルの作る面内にある成分 ($(\frac{d\sigma}{d\Omega})_{\parallel}$ と表記) および、それに垂直な成分 ($(\frac{d\sigma}{d\Omega})_{\perp}$) にわけることができ、各々は以下のように表される。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_{\parallel}} = \frac{1}{4} r_0^2 \frac{E^2}{E_0^2} \left[\frac{E}{E_0} + \frac{E_0}{E} - 2 + 4(1 - \sin^2 \theta \cos^2 \phi) \right] \quad (3.8)$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_{\perp}} = \frac{1}{4} r_0^2 \frac{E^2}{E_0^2} \left[\frac{E}{E_0} + \frac{E_0}{E} - 2 \right] \quad (3.9)$$

ここで散乱の角度 (θ, ϕ) によらず、平行成分が確率の最大値、垂直成分が確率の最小値をとり、散乱光子の偏光度は

$$P \equiv \frac{(\frac{d\sigma}{d\Omega})_{\parallel} - (\frac{d\sigma}{d\Omega})_{\perp}}{(\frac{d\sigma}{d\Omega})_{\parallel} + (\frac{d\sigma}{d\Omega})_{\perp}} = \frac{2(1 - \sin^2 \theta \cos^2 \phi)}{\frac{E}{E_0} + \frac{E_0}{E} - 2 \sin^2 \theta \cos^2 \phi} \quad (3.10)$$

となる。そこで Geant4 で 100 keV の光子を plastic シミュレーターに入射させ、散乱後の偏光ベクトルが光子の進行方向に垂直な面内にあること(つまり、物理的に適切な方向を向いていること)、および式 3.10 で予言される偏光度になっていることを検証した。前方散乱 ($\theta = 0^\circ$)、後方散乱 ($\theta = 180^\circ$)、そして 90 度散乱したときの方位角 ϕ が 45 度、135 度への散乱について調べた。この結果を図 3.10 にまとめる。ここで、縦軸に散乱後の偏光ベクトルの方位角を横軸にその散乱角を記した。この図から、前方散乱と 90 度散乱は偏光ベクトルの向きがほぼそろっており、これは式 3.10 から偏光度がほぼ 100 % であることに合致する。また前方散乱の場合は、散乱後の偏光ベクトルの向きは散乱前のそれにほぼ等しく、90 度散乱の場合は進行方向に垂直な面内で元の向きに平行になっており、物理的に適切な方向を向いていることが分かった。一方、後方散乱では式 3.10 より偏光度が 100 % にならないと予言され、図 3.10 右上はこれと定性的に合致する。

次に、偏光度が式 3.10 に従っているかを定量的に見るために入射光子の偏光方向と、散乱光子の偏光方向のなす角 Θ の頻度分布を前方散乱と後方散乱について調べたものを図 3.11 に示す。左図が前方散乱であり、参考のために Geant4 のバグを修正する前の結果を重ね書きした(紫のヒストグラム)。バグの修正により、バラバラだった偏光ベクトルがきれいに揃ったことが分かる。また、式 3.10 より前方散乱の偏光度 ($\theta = 0^\circ$ の場合) は $P = 1$ 、つまり完全偏光であり、黒のヒストグラムはこれに合致する。また、後方散乱 ($\theta = 180^\circ$) では式 3.10 より $P = 0.95$ と計算される。図 3.11(右)より、もとの偏光ベクトルに平行なイベント(0 度付近の山)は 598 個、それ以外で様々な角度に散らばっているイベントは 28 個であり、偏

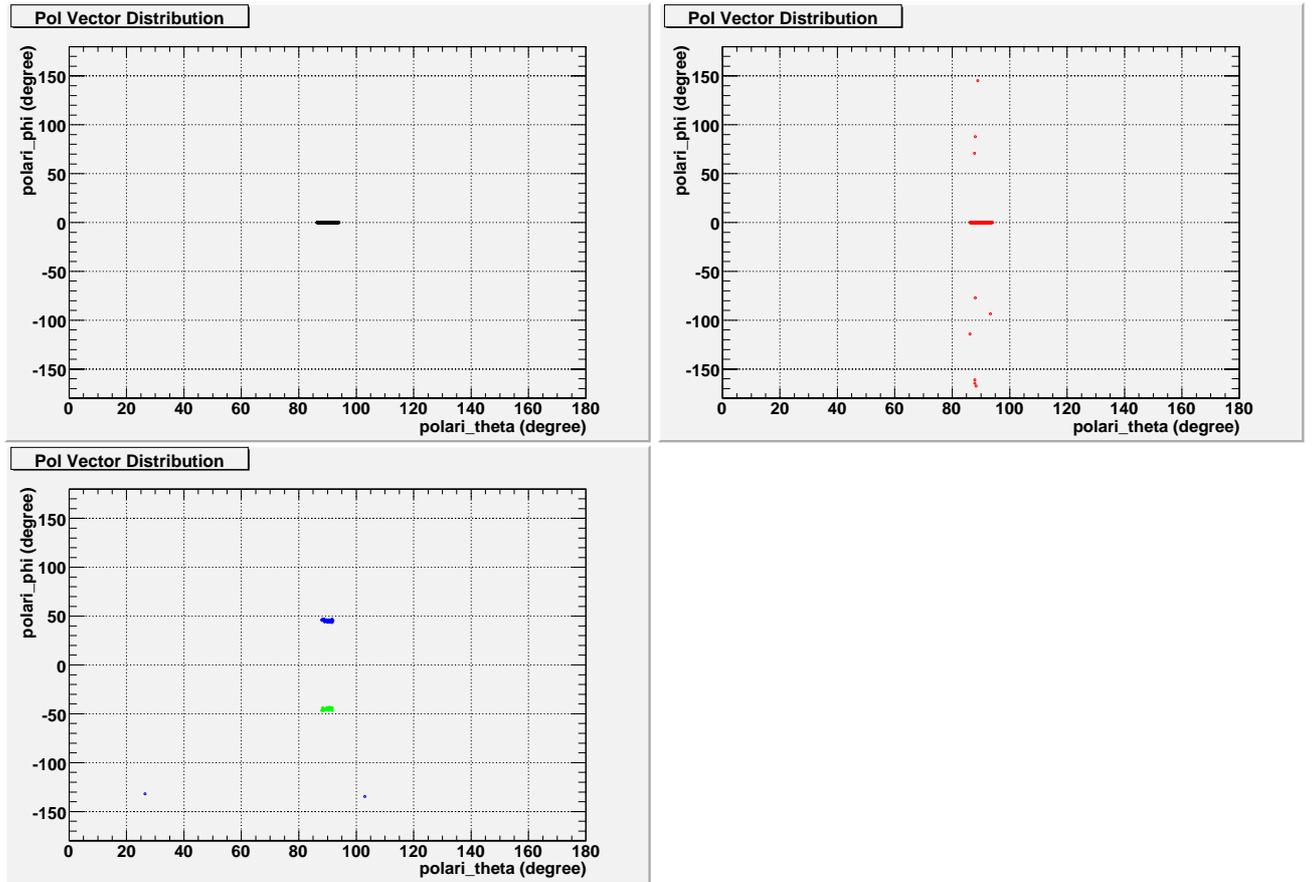


図 3.10: 散乱後の偏光ベクトルの散乱角と、方位角の分布。図 2.1 の θ および ϕ と同じ定義を利用した。左上図は前方散乱、右上図は後方散乱のものである。下図は 90 度散乱のものであり、緑が方位角 $\phi = 45^\circ$ 、青が $\phi = 135^\circ$ である。

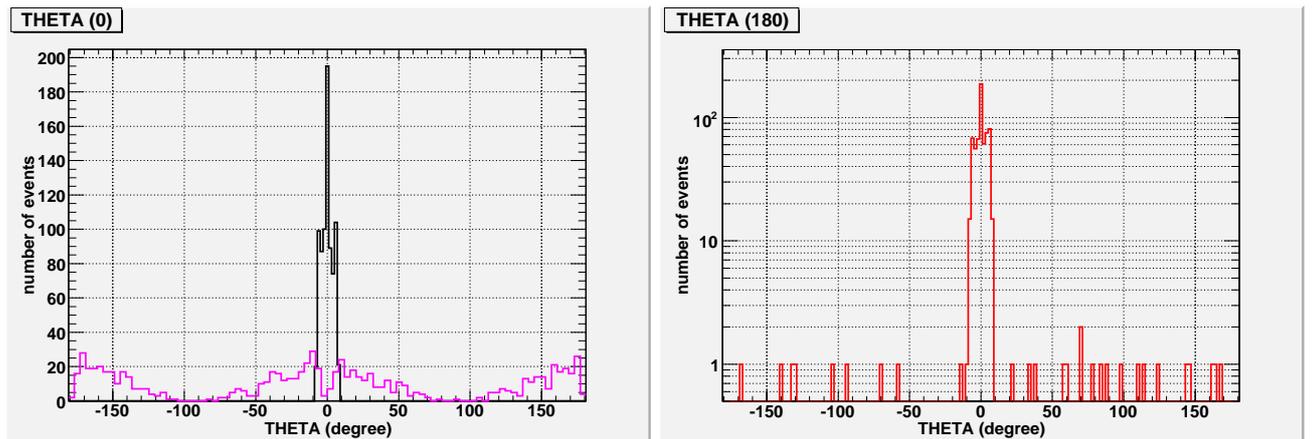


図 3.11: 前方散乱 (左) および後方散乱 (右) における散乱前後の偏光ベクトルのなす角の頻度分布。入射光子のエネルギーは 100 keV である。参考のために偏光光子のコンプトン散乱に関するバグを我々自身で修正する前の分布を紫のヒストグラムで示す (前方散乱のみ)。

光度は $95.5 \pm 0.8\%$ と計算され、理論値通りになっている。このことから入射前後の偏光ベクトルの角度分布が正しいことが分かった。

以上で、反応断面積とコンプトン散乱の角度依存性を、Geant4 が正しくシミュレーションしていることが確認できた。次章からは実際に Geant4 を用いて偏光検出器のデザインを行う。

第4章 偏光検出器のデザイン評価

前章までで、Geant4を用いて偏光検出器中で起こる反応を正しくシミュレーションできることが確認できた。本章では Geant4 を用い、硬 X 線望遠鏡と組み合わせた装置の性能評価、およびデザインの最適化を行う。まず比較対称として、コリメータ型偏光計である PoGOLite の装置の概要と、性能について触れる。続いて、硬 X 線望遠鏡を用いた偏光計について調べる。

4.1 PoGOLite の概要と性能

PoGOLite 検出器は『すざく』衛星の硬 X 線検出器でも採用された井戸型フォスウィッチカウンターのデザインを用いることによって低バックグラウンド化を実現し、コンプトン散乱の異方性を利用して 25 keV から 100 keV の領域で偏光観測を行う検出器である。1つのユニットは減衰時定数が 2ns のプラスチックシンチレーター (fast シンチレーター)、230ns のプラスチックシンチレーター (slow シンチレーター) と BGO シンチレーターのそれぞれ異なる時定数をもつシンチレーターで構成されており、読み出しは一本の同じ光電子増倍管で行う構造となっている。これを 217 本蜂の巣状に並べ側面を 54 本の BGO シールドで囲む構造をとる (図 4.1)。PoGOLite 検出器はこれまで、広島大学、東京工業大学、米国 SLAC やスウェーデンを中心に装置およびシミュレーションプログラムを開発してきた ([8][9][10][11])。

最新のシミュレーションによると、有効面積、モジュレーションファクターおよびバックグラウンドは図 4.2 および、図 4.3 のように求められている [12]。感度に効いてくるバックグラウンドは 20 keV から 80 keV でおよそ 1.77 c/s であり、これは 0.1 Crab に相当する。これは他のミッションよりおよそ 1 桁低い値であり、PoGOLite の高感度を支える。また反射材にシンチレーション光に対する反射率の高い 3M 社の VM2000 を用い、光電子増倍管も集光率の高い物を用いることで、BGO シンチレーターを通した後でも 2 keV あたり 1 光電子程度の集光率を達成している。これによりエネルギースレッシュホールドを 2 keV 程度まで下げることが可能となり、低いエネルギーの信号まで取得できる。

偏光計の感度を表す指標として、どこまで小さい偏光度を観測できるかという

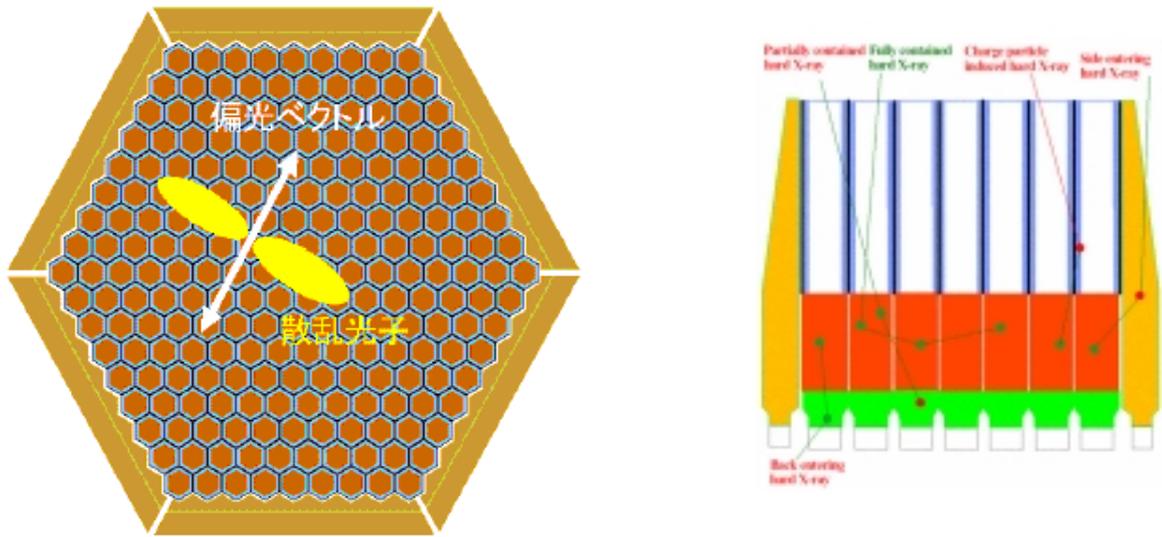


図 4.1: (左) 真上から見た PoGO Lite 検出器。X 線光子は偏光ベクトルに対して垂直方向に散乱しやすく、この散乱方位角から偏光方向を測る。(右) PoGO Lite 検出器の断面図 ([10] より借用)。バックグラウンドおよび偏光イベントの例も図示してある。

数値 ((Minimum Detector Polarization ; MDP) が広く用いられている [13] より

$$MDP = \frac{n_\sigma}{MF_{100} \times R_s} \sqrt{\frac{2(R_s + R_b)}{T}} \quad (4.1)$$

と表される。ただし、 n_σ は何シグマの有為度で偏光が検出できるかを示すもので、ここでは 3 をとる。 MF_{100} は入射光子が 100 % 偏光しているときのモジュレーションファクター、 R_s は信号のカウントレート、 R_b はバックグラウンド、 T は観測時間である。つまり、信号強度 R_s およびモジュレーションファクター MF が大きいほど小さい偏光まで検出できる一方、バックグラウンド R_b が大きいと感度が悪くなることを示している。なお、この式は統計誤差のみを考慮しており、無限に観測時間をとればどんなに小さい偏光度も検出可能となる。しかし、実際はバックグラウンドによる角度分布がわずかな擬似的モジュレーションをもちうるため、信号強度がバックグラウンドより大幅に弱い場合は、偏光検出は難しくなることに注意が必要である。

PoGO Lite の場合、図 4.2、図 4.3 より、カニ星雲の 1/10 の強度の信号に対して 20-80 keV の範囲で $R_s = 1.52$ c/s であり、 $R_b = 1.77$ c/s、 $MF_{100} = 0.325$ であるから、 MDP は約 11 % となる。競合する他のミッションはカニ星雲からの 10-20 % 程度の偏光観測を目標としており、PoGO Lite がおよそ 1 桁高い感度をもつことが分かる。

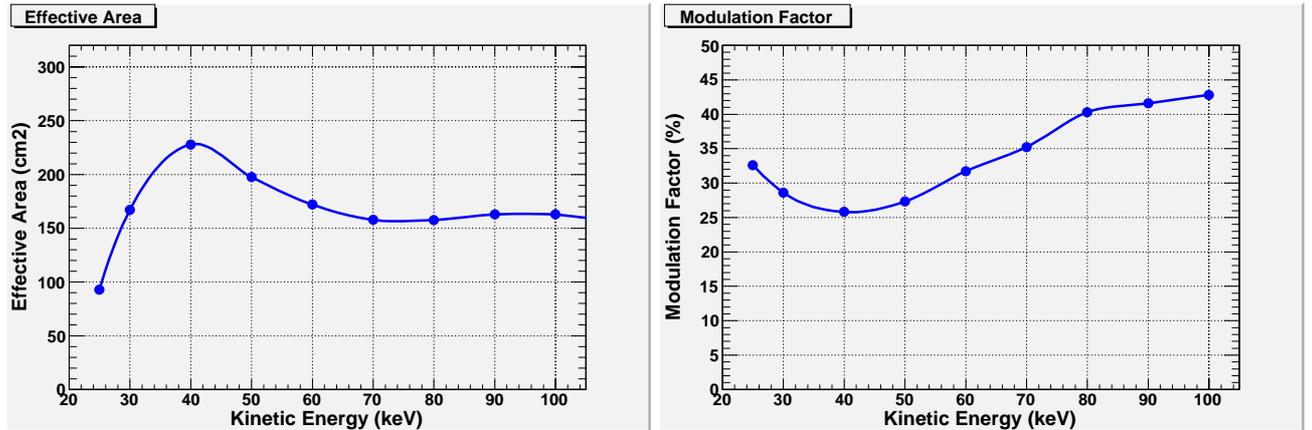


図 4.2: PoGOLite 検出器における有効面積 (左図) とモジュレーションファクター (右図)。[12] より借用。

4.2 偏光検出器のデザイン候補

PoGOLiteのようなコリメータ型の偏光計に対し、硬X線望遠鏡を用いた偏光計は装置をコンパクトにできるため、有効面積を保ったままバックグラウンドを低減できる。また形状を工夫することで、モジュレーションファクターを大きくすることも可能である。ここでは検出器のデザインの候補として、以下の2つを考える。

まず第一の候補はPoGOLiteと同じく六角柱のシンチレーターを用いる物である。図4.4(左)のように中心に六角柱のplasticシンチレータを1ユニットおき散乱体とし、その周りに吸収体として、GSOシンチレータを12ユニットならべる構造をとる。底面および側面はバックグラウンドを除去するために六角柱のBGOシンチレータで囲む。これをpatternAと呼ぶことにする。

第二の候補は面積の大きな位置検出型光電子増倍管(PMT)を用い、図4.4(右)のように小さな直方体のplasticシンチレーター(散乱体)とCsIシンチレーター(吸収体)を並べたものである。山形大学、大阪大学などが開発しているPHENEX[1]のデザインを基にしており、PMTとしては浜松ホトクス社のH8500を念頭におき、幅5mm×5mm程のplasticシンチレーターを中心に36ユニット、その周りに28ユニットのCsIシンチレータを並べる。バックグラウンドを除去するために吸収体、散乱体、光電子増倍管をBGOシンチレータで囲む。これをpatternBと名付ける。

前者は主検出部(plasticシンチレーターおよびGSOシンチレーター)を直接BGOシンチレーターで囲むため、バックグラウンド除去に優れる。比較的大きなシンチレーター(幅2-3cm)を独立の光電子増倍管で読み出すので、BGOシンチレーターを通して十分大きい光量が期待できる。しかし、イメージング能力はなく、散乱体のどこに光子が来たかを知る手段がないため、モジュレーションファクターの不定性が大きい。そこで、散乱体と吸収体の間は1ユニット分すき間を取った。それでも、吸収体が12ユニットしかないので、小さい偏光度まで検出することが

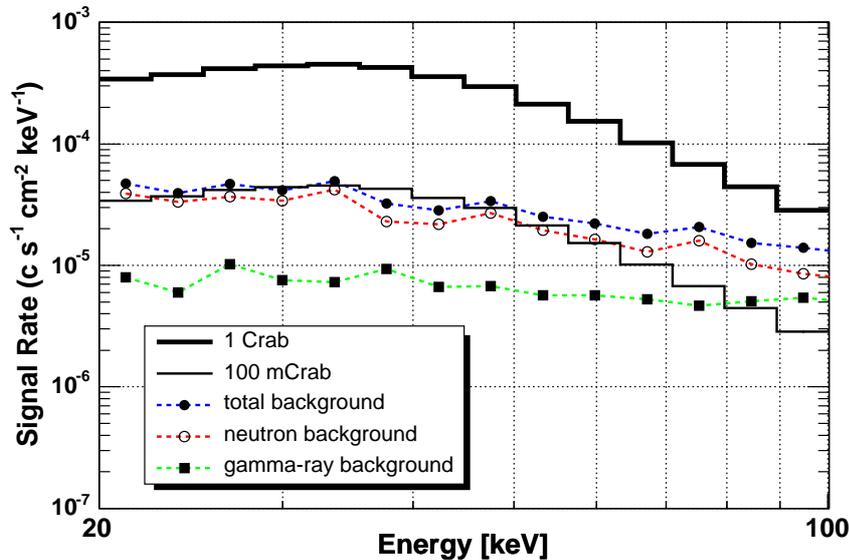


図 4.3: PoGO Lite 検出器における信号強度およびバックグラウンドの評価。[12]より借用。

若干困難である。後者は 1 cm 以下の細いシンチレータを並べ、一つの位置分解能の機能を持った光電子増倍管で読み出すことで高い角分解能を持ち、小さな偏光度も検出ができると期待される。しかし、吸収体の幅が狭いので光子の集光効率では劣る。また、BGO を通すと位置分解能もぼかされてしまうので、BGO シンチレーターは PMT の下部に配置することになる。このためバックグラウンド除去は patternA に比べ若干劣ると考えられる。この章では、両者の性能を評価し、シンチレーターのサイズの最適化をすることでどちらの検出器が硬 X 線反射望遠鏡と相性がよいかを判断する。

4.3 光子の収集効率を重視した検出器 (patternA)

まず patternA 検出器を、PoGO Lite にならいシンチレーターの幅 2.8cm にし、長さは 10cm のサイズで Geant4 内に実現して、10 万個の光子を plastic シンチレータに入射して検出器の性能を評価する。性能評価では有効面積とモジュレーションファクタから検出できる最小偏光度 (MDP) を計算する。ここで、エネルギーレスシールドを考慮する必要がある。このデザインの基となった PoGO Lite 検出器の例 ([8][9][10][11]) より、2 keV を到達可能なレスシールドとみなす。この値が達成できない場合の性能も合わせて調べるため、2 から 5 keV の範囲で 1 keV 刻みでレスシールドを変化させて、有効面積とモジュレーションファクタを評価する。次に、レスシールドを 2 keV に設定し、検出器の長さを変え、もっと

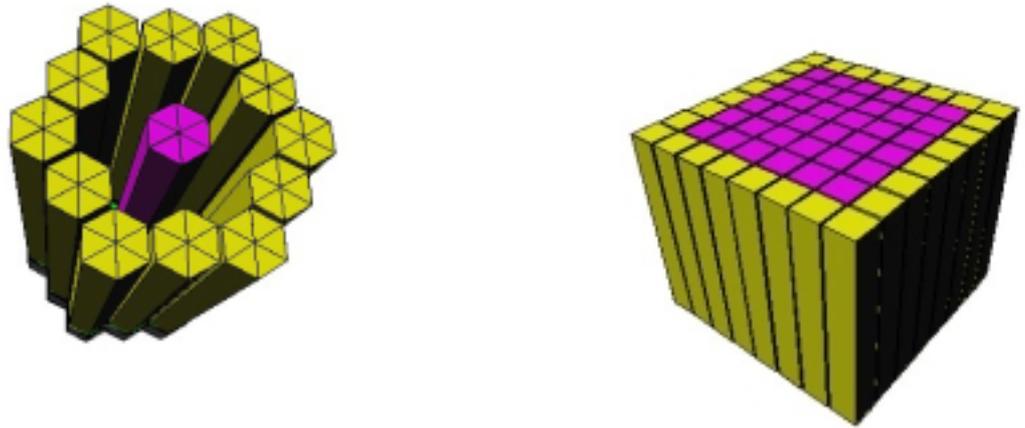


図 4.4: 左側が Geant4 シミュレーションで実現した patternA の構造。赤が plastic シンチレータ、黄が GSO シンチレータである。ただし、構造が見にくくなるため BGO シンチレータは省いた。右側が Geant4 シミュレーションで実現した patternB の構造。赤が plastic シンチレータ、黄が CsI シンチレータである。こちらも、構造が見にくくなるため BGO シンチレータは省いた。

も偏光計検出器にふさわしいデザインを探る。

4.3.1 有効面積の評価

入射された 10 万個の光子うちの、散乱体である plastic シンチレータでコンプトン散乱され、吸収体である GSO シンチレータで光電吸収された光子の割合から検出器の反応確率が求まる。この反応確率に硬 X 線反射望遠鏡の有効面積 (図 4.5) を掛け合わせることでこの検出器の有効面積を求めることができる。像は数 mm 程度の大きさのコア (信号の集中する部分) をもつので、簡単のため散乱体の中心の全ての光子が集光されたと仮定し、エネルギースレッシュホールドを 2-5 keV まで変化させた場合の反応確率を図 4.6、有効面積を図 4.7 に示す。参考のために、スレッシュホールドが 0 keV の場合も合わせて示す。ここで簡略化するために、シンチレーターのエネルギー分解能を考慮せずに計算した。図 4.7 から、patternA 検出器と多層膜スーパーミラーを組み合わせた偏光計はエネルギースレッシュホールドが 2 keV のときは 30-70 keV に感度をもつことが分かる。スレッシュホールドが大きくなるにつれ感度のある領域は狭くなる。また、例えばスレッシュホールドが 2 keV と 3 keV の場合では、エネルギーにより有効面積が 10 % から倍以上も異なり、スレッシュホールドを下げることで有効面積を大きくするのに効果的であることも分かる。

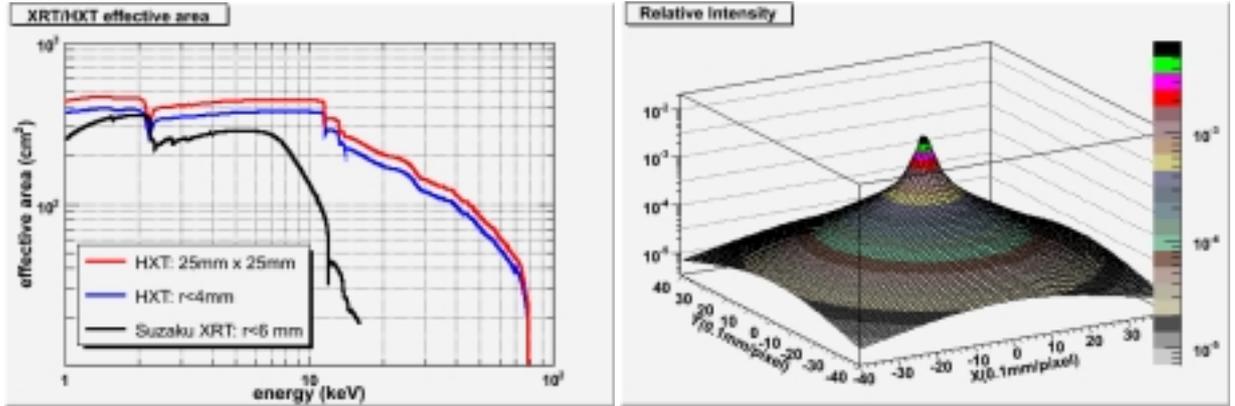


図 4.5: NeXT 衛星用多層膜スーパーミラーの性能。左図がエネルギーに対する有効面積で、赤と青が多層膜スーパーミラーの値を示し(色は積分領域の違い)、本論文では赤色の有効面積 (25cm × 25cm) を採用した。比較のため、「すざく」衛星の全反射鏡の有効面積を黒で示す。右図は多層膜スーパーミラーのイメージのプロファイル。

4.3.2 モジュレーションファクターの評価

続いて、patternA 検出器についてモジュレーションファクターを求める。しかし、plastic シンチレータとそれぞれの GSO シンチレータの距離は場所により異なり、patternA 検出器では距離が二通りある (図 4.8)。そこで、同じ距離同士のシンチレータでモジュレーションカーブを書き、各々のモジュレーションファクターの重みつき平均が patternA 検出器のモジュレーションファクターとなる。これも有効面積と同様にエネルギースレッシュホールドが 0 keV、2 keV、3 keV、4 keV、5 keV の場合について求める。ここで、モジュレーションカーブの代表例として図 4.9 にエネルギースレッシュホールドが 2 keV で入射光子エネルギー 40 keV のものを載せる。他のスレッシュホールド、他のエネルギーに対しても同様にモジュレーションファクターを求めた結果を図 4.10 にまとめる。このグラフから 0 keV、2 keV、3 keV、4 keV、5 keV のエネルギースレッシュホールドに対するそれぞれのモジュレーションファクターは感度のあるエネルギーにおいて 0.56、0.57、0.55、0.51、0.51 でほぼ一定であるとみなす。

4.3.3 検出可能偏光度 (MDP)

patternA 検出器の到達可能なエネルギースレッシュホールド (2 keV) の時の MDP を求め、その性能を評価する。まず、代表的な天体であるカニ星雲を観測したときの MDP を求める。カニ星雲からの単位時間単位面積あたりのフラックスは、光子のエネルギー E_{keV} の関数として

$$F = 9.7(E_{\text{keV}})^{-2.10}(\text{c/s/cm}^2/\text{keV}) \quad (4.2)$$

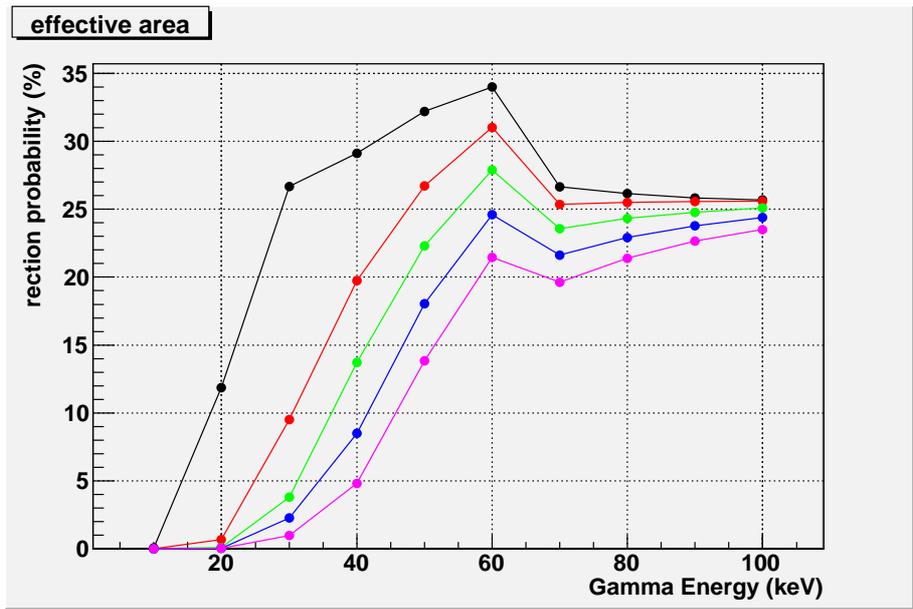


図 4.6: 長さ 10 cm での patternA 検出器の反応確率 (入射光子 10 万個)。エネルギーシールドは黒が 0 keV、赤が 2 keV、緑が 3 keV、青が 4 keV、紫が 5 keV を示す。

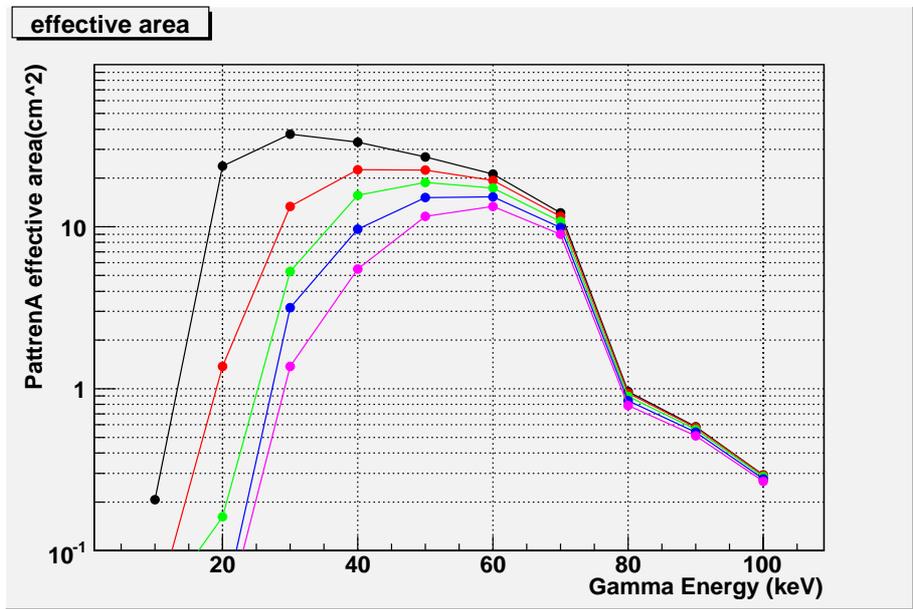


図 4.7: 長さ 10 cm での patternA 検出器と多層膜スーパーミラーを組み合わせた偏光計検出器の有効面積 (入射光子 10 万個)。図 4.6 と同様に、エネルギーシールドは黒が 0 keV、赤が 2 keV、緑が 3 keV、青が 4 keV、紫が 5 keV を示す。

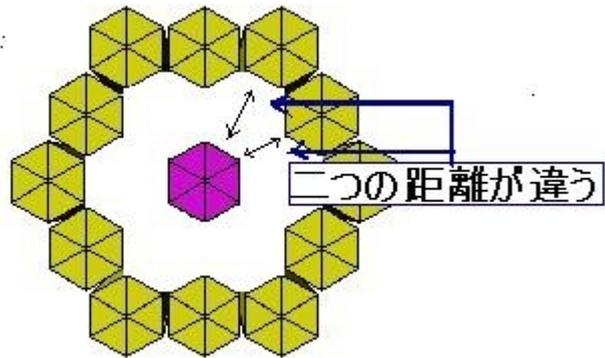


図 4.8: patternA 検出器 を正面から見た構造。赤がプラスチックシンチレータ、黄が GSO シンチレータである。

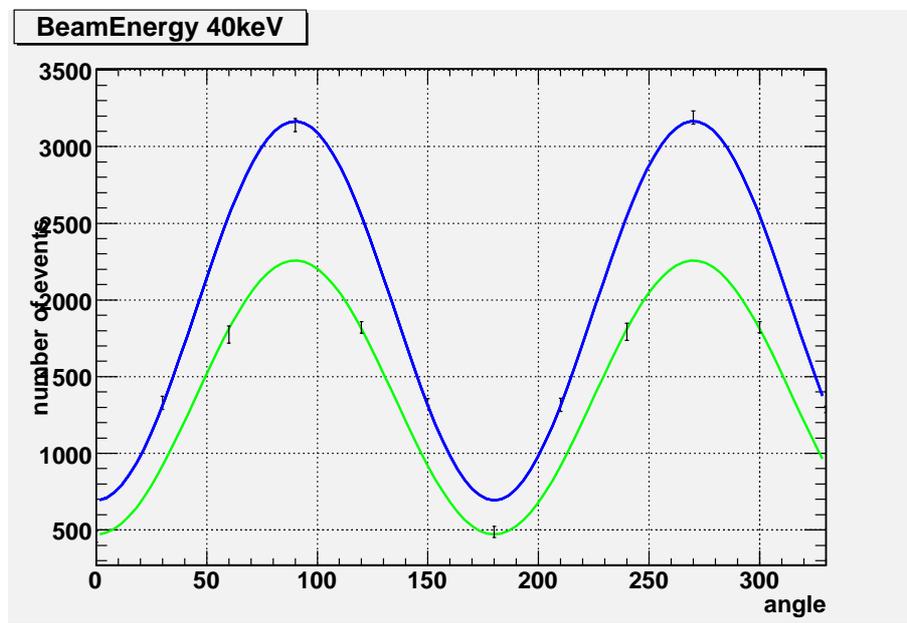


図 4.9: patternA 検出器におけるエネルギーシreshold 2 keV 下で入射光子エネルギー 40 keV のモジュレーションカーブ。青が散乱体と吸収体の距離が長いもの、緑が短い物である。

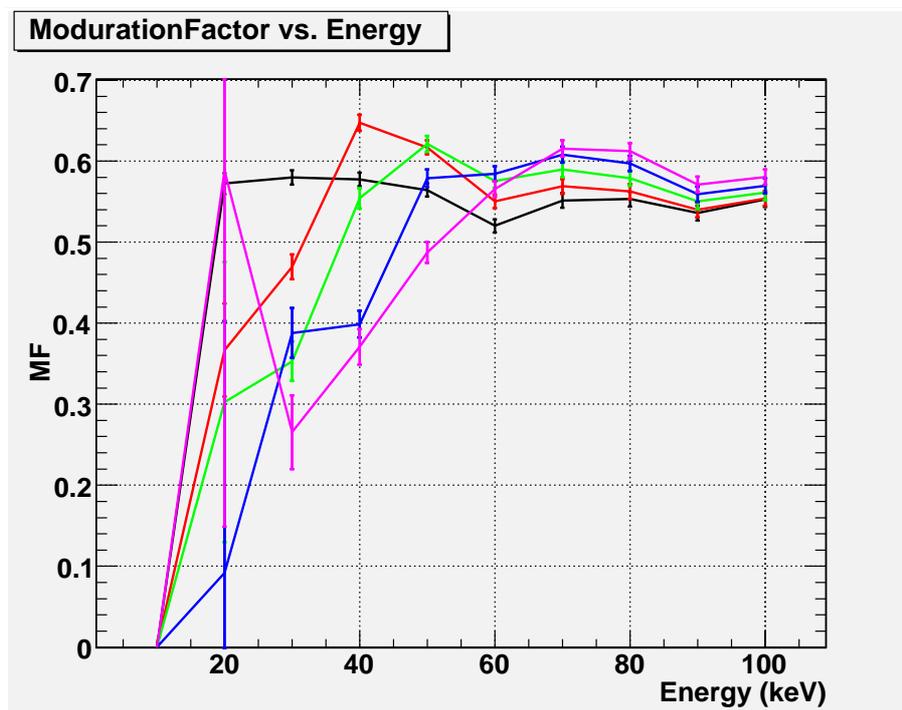


図 4.10: 長さ 10 cm での patternA 検出器におけるモジュレーションファクター。
 図 4.6 と同様に、エネルギーシールドは黒が 0 keV、赤が 2 keV、緑が 3 keV、
 青が 4 keV、紫が 5 keV を示す。

と表せる ([14])。図 4.7 から、観測可能な領域は 30-70 keV 程度である。そこで 30-35 keV の有効面積は 30 keV のそれで、35-45 keV の有効面積は 40 keV のそれで、45-55 keV の有効面積は 50 keV のそれで、というように代表させ、各バンドでのフラックスを式 4.2 からもとめ、掛け合わせることで信号のレートを求めることができ、 $R_s=2.44$ c/s となった。バックグラウンドは PoGO 検出器のフルシミュレーションで得られた値を体積比でスケールさせる。4.1 節で述べたように、PoGOLite のバックグラウンドのレートは 1.77 c/s(20cm, 217 ユニット) である一方、本検出器は 13 ユニットである。さらに、コリメータ型は全ユニットが散乱体、吸収体となるのに対し、本検出器は真ん中のユニットだけが散乱体として働くから、場合の数も考慮して

$$R_b = 1.77 \times \frac{13}{217} \times 0.5 \times \frac{12}{{}_{13}C_2} = 0.0081(\text{c/s}) \quad (4.3)$$

となる。以上から 1 Crab の信号に対する MDP を求めると、20ks の観測時間を仮定すると $MDP=3.4\%$ となる。観測時間、信号強度を変えた場合の MDP を求めたものを図 4.11、4.12 にまとめる。ここで信号のみを考え、強度が 1 Crab、100 mCrab、10 mCrab の場合を赤、緑、青の実線で示し、バックグラウンドを入れた感度曲線を点線で示した。

比較対象の PoGOLite の場合、4.1 節で述べたように 100 mCrab の天体を 20ks 観測した場合は $MDP=11\%$ 程度であり、patternA はほぼ同程度の性能を持つことが分かった。PoGOLite は気球観測を念頭においており、大気による減衰(信号が約 40% に減る)も考慮しているので、同じ条件で比べると MDP は 7% 程度となり、patternA の方が性能は若干劣る。しかし PoGOLite では 10 mCrab 程度の弱い天体は、バックグラウンドが信号の 5-10 倍にもなり、バックグラウンドの不定性に埋もれ偏光検出は期待できない。一方 patternA は 10 mCrab の天体に対しても信号強度 (0.024 c/s) はバックグラウンドの 3 倍あまりもあり、100 ks 程度観測すれば、 MDP を現実的な範囲 (20% 以下) に下げることができる。以上から、100 mCrab 程度の天体はコリメータ型検出器で大面積を実現するの有利である一方、10 mCrab 程度の天体は硬 X 線望遠鏡との組み合わせが有効であることが分かった。

最後に、スレッシュホールドおよび検出器の長さを変化させた場合の MDP の変化を図 4.13 および図 4.14 にまとめる。図 4.13 より、スレッシュホールドを下げるのが感度を上げるのに有効であり、特に 5 keV よりスレッシュホールドが大きいと 2 keV のときに比べ感度が約 2 倍も悪くなることが分かる。また図 4.14 より、10 cm までは検出器を長くすると感度がよくなるが、それ以上では MDP はほとんど一定であり、作りやすさや集光のしやすさを考えると、patternA の長さは 10 cm が最適であることが分かった。

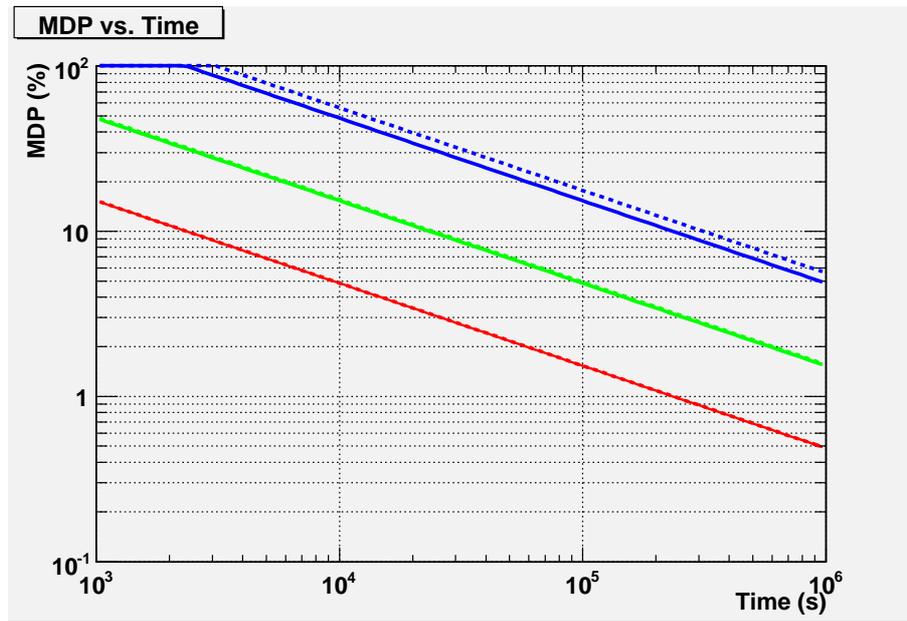


図 4.11: patternA 検出器の時間に対する MDP 。青、緑、赤はそれぞれ 10 mCrab の天体、100 mCrab の天体、1 Crab の天体を観測した場合。実線はバックグラウンドを無視した場合で、点線はバックグラウンドを考慮した感度曲線を示す。

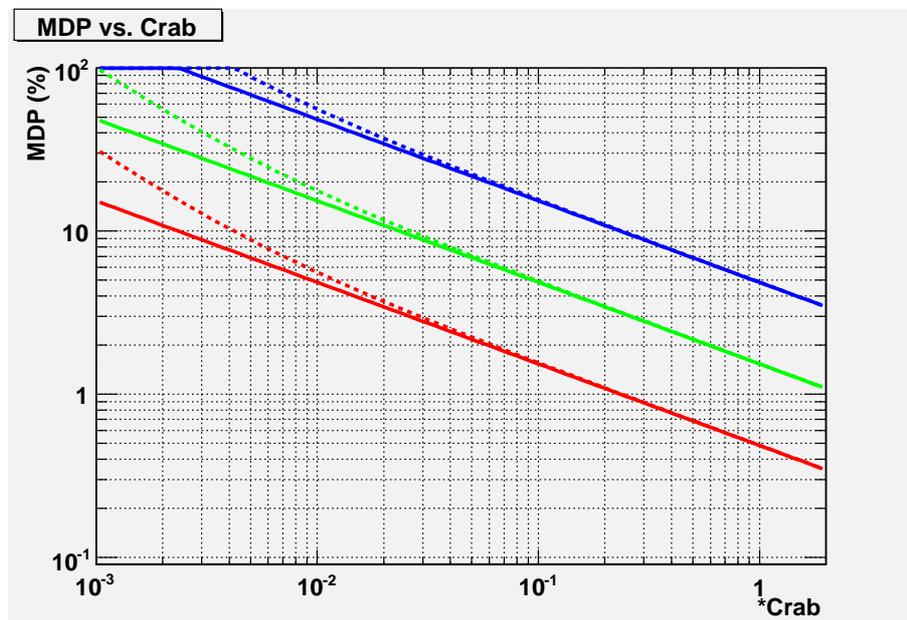


図 4.12: patternA 検出器のフラックスに対する MDP 。青、緑、赤はそれぞれ観測時間 10 ks、100ks、1Ms で観測した場合。図 4.11 と同様に、実線はバックグラウンドを無視した場合で、点線はバックグラウンドを考慮した感度曲線を示す。

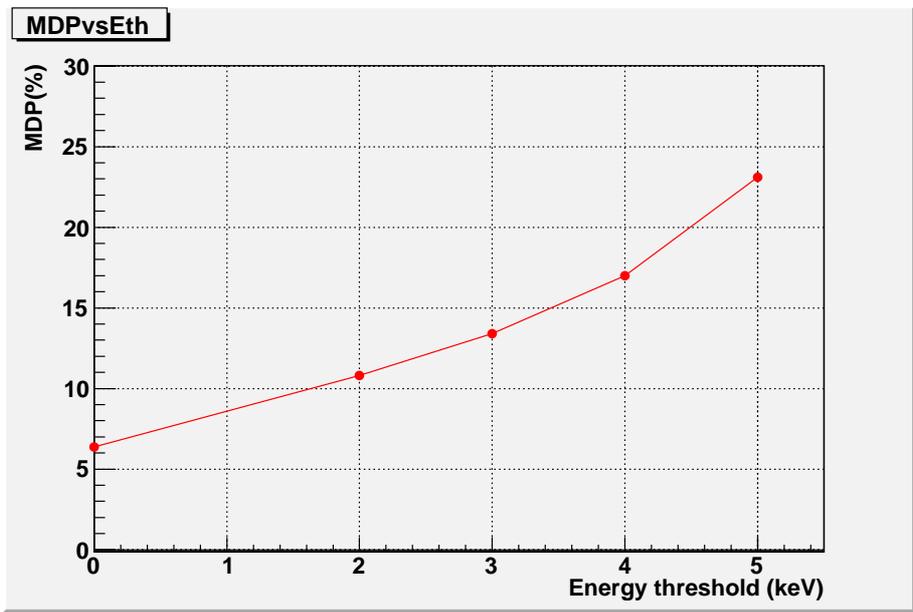


図 4.13: patternA 検出器のエネルギースレッシュホールドに対する 100 mCrab の天体を 20 ks 観測したときを想定した MDP

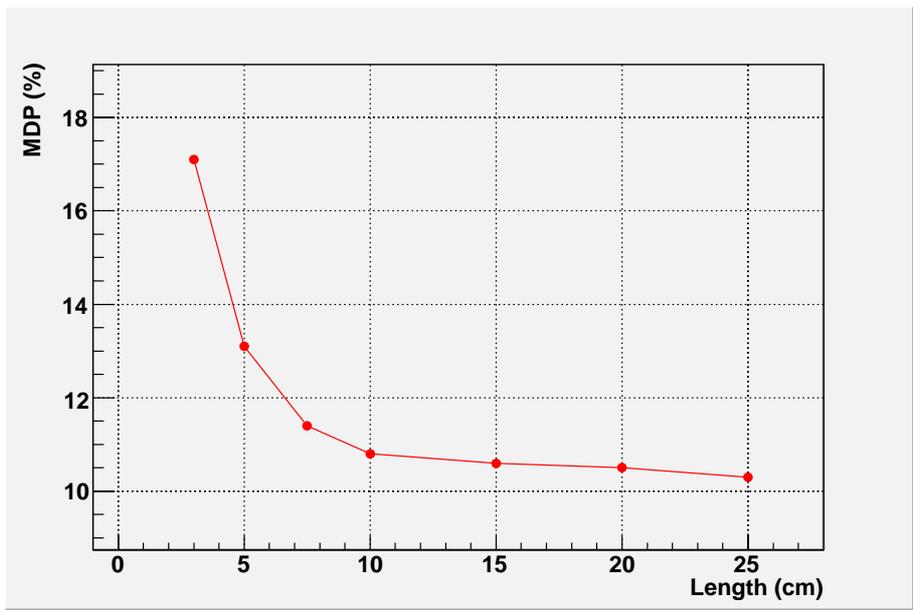


図 4.14: patternA 検出器の長さ 3 cm から 25cm における MDP

4.4 角度分解能を重視した検出器 (patternB)

patternBでは $6 \times 6 = 36$ の plastic シンチレーターを散乱体とし、そのまわりに 28 本の CsI シンチレーター (吸収体) を並べる。まずはデザインの基となった PHENEX と同じ形状の場合を調べる。このとき、シンチレーターの幅は $5.5 \text{ mm} \times 5.5 \text{ mm}$ で、長さは 4 cm である。位置検出型 PMT で読み出すので、図 4.5 の望遠鏡のプロファイルを荒くイメージングすることができ、コンプトン散乱の起きた場所を 5 mm 程度の分解能で知ることができる。そこで簡略化して、中心に位置する 4 つの plastic シンチレーターの 1 つに光子を照射して、有効面積とモジュレーションファクタを求めた。このとき、入射光子の偏光方向を 60 度ずつ変え、各々を 10 万個入射し、モジュレーションファクタを求める。検出器の性能は patternA 同様、有効面積とモジュレーションファクタで決まる *MDP* で評価する。また、この検出器も plastic シンチレーターでのエネルギースレッシュホールドを考慮する必要がある。デザインの基となった PHENEX 検出器の例 ([1]) より、やはり 2 keV で光電子 1 個程度の光量なので、patternA と同様に 2 keV を到達可能なエネルギー スレッシュホールドとみなし、 $2 \sim 5 \text{ keV}$ の範囲で 1 keV 刻みでスレッシュホールドを変化させて、有効面積とモジュレーションファクタを評価する。参考までにスレッシュホールドが 0 keV も調べた。

4.4.1 有効面積の評価

反応確率は入射された総数 60 万個の光子のうちの、散乱体である plastic シンチレーターでコンプトン散乱され、吸収体である CsI シンチレーターで光電吸収された光子の割合から求まる。この反応確率に硬 X 線反射望遠鏡の有効面積 (図 4.5) を掛け合わせることで有効面積を求めることができる。その結果を図 4.15 と図 4.16 に示す。ここから patternB と多層膜スーパーミラーを組み合わせた検出器はエネルギー スレッシュホールドが 2 keV のときに 30 keV から 70 keV に感度をもつことが分かる。スレッシュホールドが大きくなるにつれ、感度を持つ範囲が狭まることが分かる。また有効面積は、patternA の半分くらいであることも分かった。

4.4.2 Moduration Factor の評価

patternB 検出器のモジュレーションファクタを求める手順は次の通りである。まず吸収体である 28 個の CsI シンチレーターの各々とのモジュレーションファクタを求める。それら全ての重みつき平均を求めれば、それが patternB 検出器のモジュレーションファクタとなる。このときの代表例として、図 4.17 にエネルギー スレッシュホールドが 2 keV で入射エネルギー 40 keV のモジュレーションカーブを載せる。他のエネルギーに対しても同様にモジュレーションファクタを求めた結果を図 4.18 にまとめる。このグラフから 0 keV 、 2 keV 、 3 keV 、 4 keV 、 5 keV

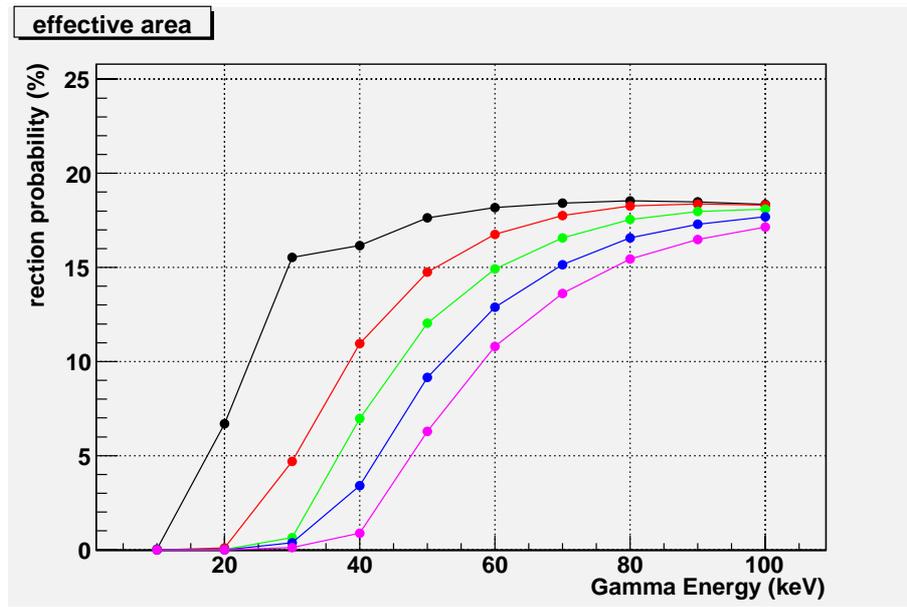


図 4.15: 長さ 4 cm での patternB 検出器の反応確率 (入射光子 60 万個)。エネルギーシールドは黒が 0 keV、赤が 2 keV、緑が 3 keV、青が 4 keV、紫が 5 keV を示す。

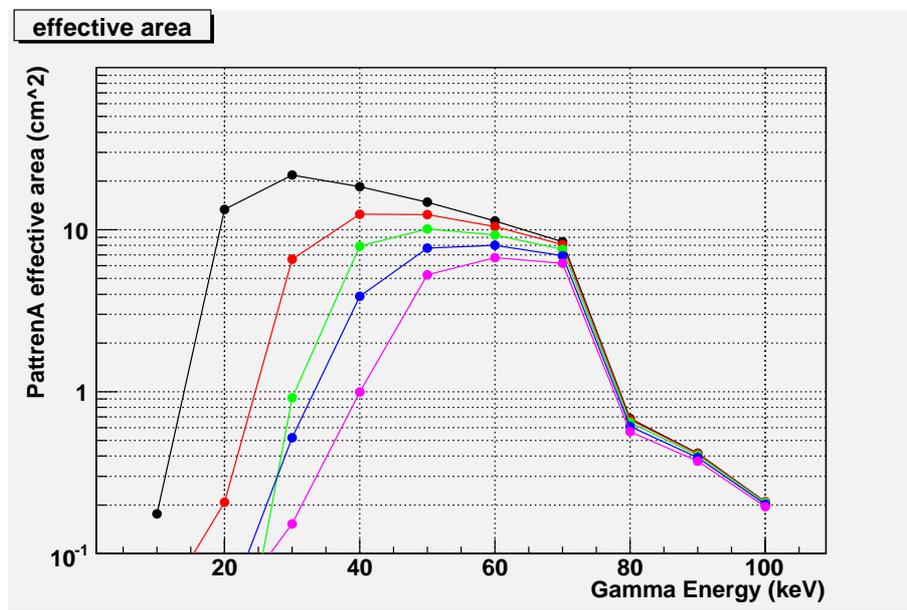


図 4.16: 長さ 4 cm での patternB 検出器と多層膜スーパーミラーを組合わせた偏光計検出器の有効面積 (入射光子 60 万個)。図 4.15 と同様にエネルギーシールドは黒が 0 keV、赤が 2 keV、緑が 3 keV、青が 4 keV、紫が 5 keV を示す。

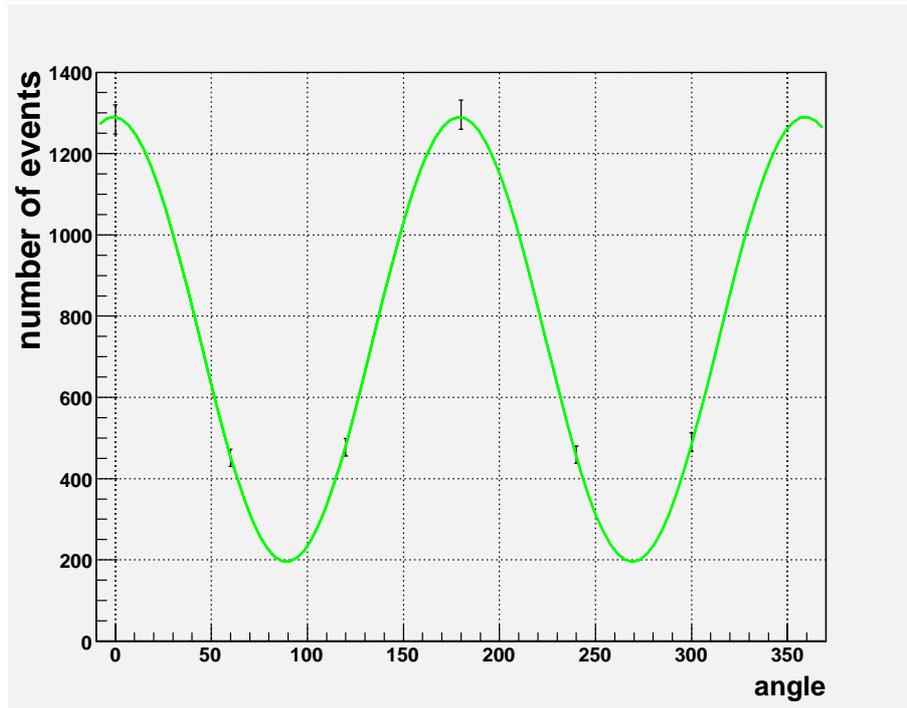


図 4.17: エネルギーししヨルドが 2 keV で、入射光子 40 keV の場合の、CsI シンチレーターの一つのモジュレーションカーブ

のエネルギーししヨルドに対するそれぞれのモジュレーションファクターは感度のあるエネルギーにおいて 0.67、0.69、0.72、0.71、0.70 で一定であるとみなす。patternA に比べると、モジュレーションファクターが 40 % 程度大きいことが分かる。

4.4.3 検出可能偏光度 (MDP)

patternB 検出器の到達可能なエネルギーししヨルド (patternA と同じで 2 keV) のときの MDP を求め、その性能を評価する。まず代表的な天体であるカニ星雲を観測したときの MDP を求める。図 4.16 から観測可能な領域は 30-70 keV 程度である。patternA と同じように、各バンドでのフラックスを式 4.2 からもとめ、掛け合わせることで信号のレートを求めることができ、 $R_s=1.33$ c/s となった。PoGOLite 検出器のバックグラウンドは 4.3.3 から 1.77 c/s であり、2.7 cm 幅の plastic シンチレーターを使用しているので、体積は 27400 cm³ ほどである。一方、本検出器は 5.5 mm × 5.5 mm × 4cm のシンチレーターを 64 ユニット並べた構造なので、77 cm³ ほどである。また、64 本から 2 つを選ぶ場合の数 (散乱体、吸収体を区別しない場合) は ${}_{64}C_2$ であるのに対し、ミラーと組み合わせると、ほと

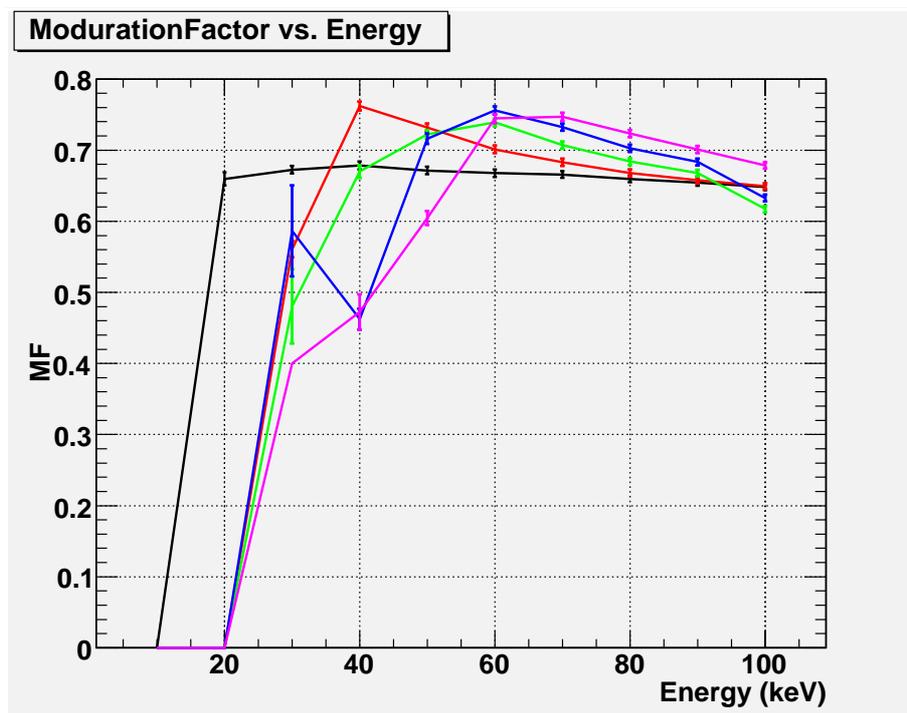


図 4.18: 長さ 4 cm での patternB 検出器におけるモジュレーションファクター。図 4.15 と同様、エネルギーシールドは黒が 0 keV、赤が 2 keV、緑が 3 keV、青が 4 keV、紫が 5 keV を示す。

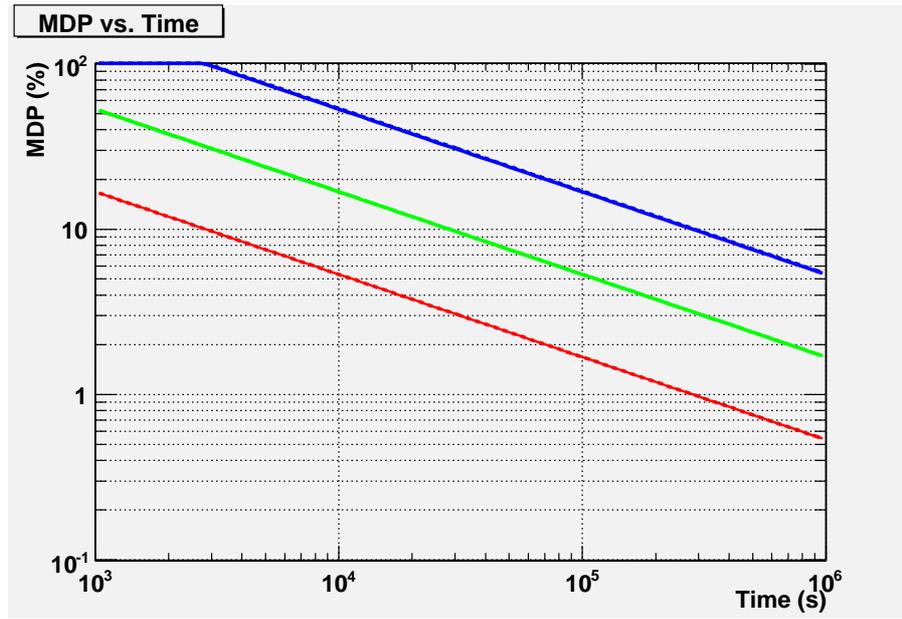


図 4.19: patrenB 検出器の時間に対する MDP 。青、緑、赤はそれぞれ 10 mCrab の天体、100 mCrab の天体、1 Crab の天体を観測した場合。実線はバックグラウンドを無視した場合で、点線はバックグラウンドを考慮した感度曲線を示す。

んどが中心の 4 本の plastic シンチレーターで散乱するので、場合の数も考慮して

$$R_b = 1.77 \times \frac{77}{27400} \times \frac{4 \times 28}{64C_2} = 0.0003(c/s) \quad (4.4)$$

に見積もられる。以上から 1 Crab の信号に対する MDP を求めると、20ks の観測時間を仮定すると $MDP=3.8\%$ となる。観測時間、信号強度を変えた場合の MDP を求めたものを図 4.19、4.20 にまとめる。ここで信号のみを考え、強度が 1 Crab、100 mCrab、10 mCrab の場合を赤、緑、青の実線で示し、バックグラウンドを入れた感度曲線を点線で示した。

図 4.11、図 4.12 と比べると、patternA とほぼ等しい MDP であることがわかる。ただし、バックグラウンドがより低いため、暗い天体では patternB の方が有利である。また、スレッシュヨルドおよび検出器の長さを変化させた場合の MDP の変化を図 4.21 および図 4.22 にまとめる。図 4.21 より、スレッシュヨルドを下げることで感度を上げるのに有効であり、特に 5 keV よりスレッシュヨルドが大きいと感度が大幅に下がることが分かる。また図 4.22 より、4 cm までは検出器を長くすると感度がよくなるが、それ以上では MDP はほとんど一定であり、作りやすさや集光のしやすさを考えると、patternB の長さは 4 cm が最適であることが分かった。



図 4.20: patternB 検出器のフラックスに対する MDP 。青、緑、赤はそれぞれ観測時間 10 ks、100ks、1Ms で観測した場合。図 4.19 と同様に、実線はバックグラウンドを無視した場合で、点線はバックグラウンドを考慮した感度曲線を示す。

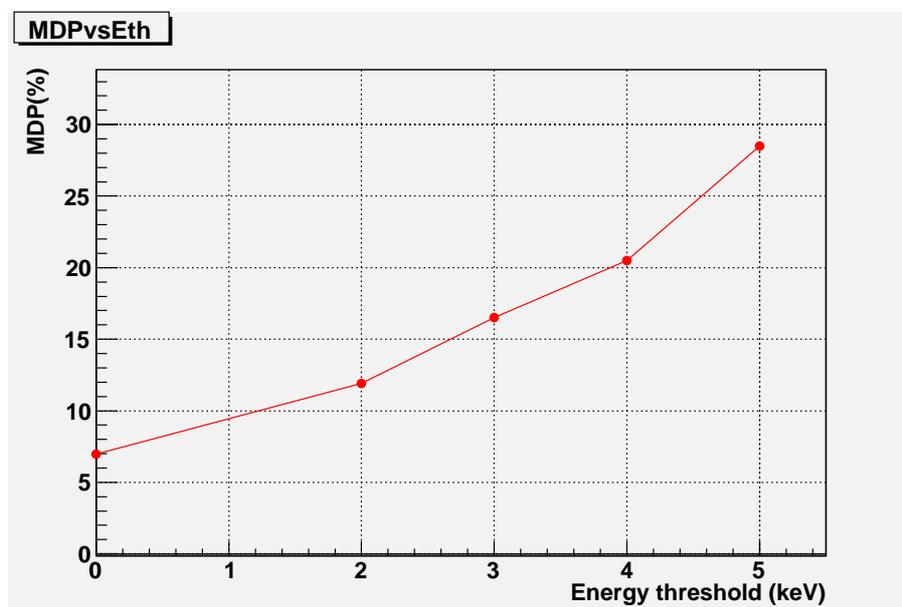


図 4.21: patternB 検出器のエネルギーレシヨルドに対する 100 mCrab の天体を 20 ks 観測したときを想定した MDP

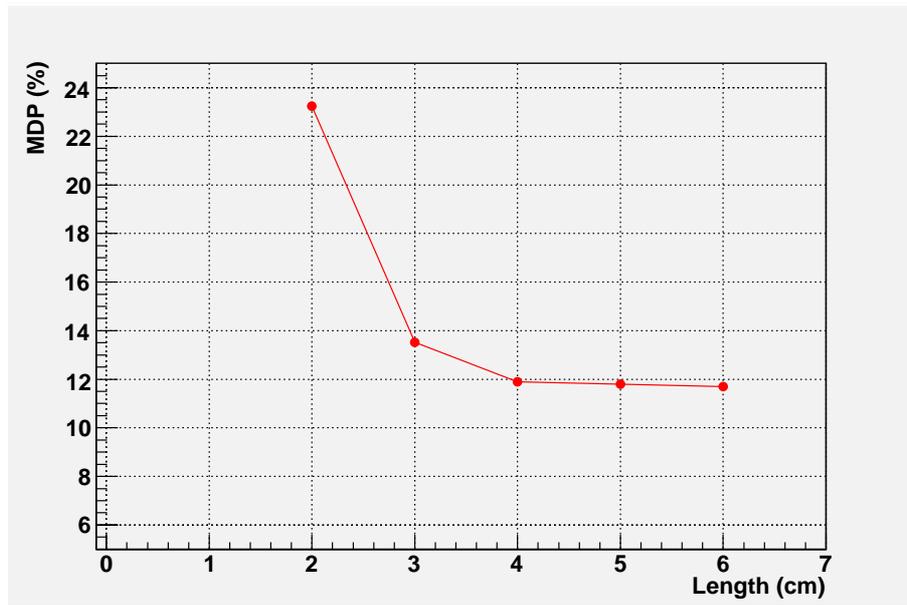


図 4.22: patternB 検出器の長さ 2 cm から 6 cm における MDP

4.5 望遠鏡型偏光計にふさわしいスタイル

これまで調べてきたように、100 mCrab の天体を 20 ks 観測する場合で、大気よる減衰のない条件下での PoGOLite の MDP 、硬 X 線望遠鏡と組み合わせた patternA 検出器、patternB 検出器の MDP はそれぞれ 7 %、11 %、12 % である。このことから 100 mCrab の天体を 20 ks 観測する場合においてはコリメータ型検出器で大面積を実現した方が有効である。10mCrab 程度の天体は、PoGOLite 型はバックグラウンドが信号の 5 倍程度もあり、バックグラウンドの不定性を考えると偏光検出が現実的でない一方、patternA は信号がバックグラウンドの 3 倍、patternB はほぼ 50 倍であり、観測が可能である。また荒くはあるがイメージが取れること、信号とバックグラウンドの比がより大きいことから、patternB が最も有利であると言える。

第5章 まとめと今後の課題

本研究では、従来考えられてきたコリメータ型の偏光計の技術と、硬X線反射望遠鏡を組み合わせることで、広いエネルギー領域に高い感度をもつ次世代型偏光計をデザインした。検出器のモンテカルロシミュレーションには、高エネルギーや宇宙物理学の分野で標準となっている Geant4 を用いた。まず単純なジオメトリで、偏光計に関連する物理プロセスの検証を行い、関連する反応を正しくシミュレーションできることを確認した(3章)。続いて、硬X線望遠鏡と組み合わせるべき検出器として2種類の形状を考え(patternA および patternB とよぶ)、有効面積、モジュレーションファクタ、および検出可能偏光度 (MDP) を調べた(4章)。従来型の検出器である PoGOLite の性能とも比較することで、以下のことが分かった。

- ・ 100mCrab 程度の強度の天体は、大面積が実現できる PoGOLite が有利である
- ・ 10mCrab 程度の信号は、バックグラウンドの不定性も考えると、硬X線望遠鏡の使用が望ましい
- ・ 100ks 程度の観測で、現実的な感度 (MDP が 20 % 以下) を達成できる

また、patternA と patternB は MDP 自体は同程度だが、細い4角柱を並べ、位置検出型 PMT で読み出す patternB の方が、イメージングが可能であること、信号とバックグラウンドの比が大きいことから、有利と考えられる。ただし、BGO シンチレーターを PMT の外側に配置しなければならないため、バックグラウンド除去には注意が必要である。

今後の課題としては、まずシンチレーターのエネルギー分解能を考慮していないので、統計揺らぎをいれて有効面積、モジュレーションファクタ、 MDP を評価することが挙げられる。またバックグラウンドも PoGOLite の場合の評価からのスケールリングで議論しているが、フルシミュレーションで精度よく評価し、性能をより正しく見積もる必要がある。あわせてバックグラウンドを効率よく除去するためのシールドの厚み、形状の最適化も図るようにしたい。

謝辞

大杉先生、深沢先生には、1年間の研究生生活でいろいろと指導をくださったことを深く感謝しています。そして、これまでの大学生活で、研究についての知識を蓄えてこなかった私を見捨てることなく卒業論文を書き上げれるほどに成長させてくださった水野さんには感謝します。イタリアに主張のときですら卒論のことを気にかけてくださり、ありがとうございました。吉田さん、西野さんがパソコンについての知識が無であった私にひとつ一つ丁寧に指導して下さったおかげで、ある程度のプログラムをかけるようになりました。さらなる高みを目指してプログラムの勉強をしたいと思います。吉田さんにはGeant4の扱い方まで教わり、感謝しています。二人がいなければ私は卒業論文を書き終わることはなかったと思います。ありがとうございました。論文につまるとやさしいお言葉で癒して下さった松井さん、吉良さん、ありがとうございました。上原さんにはポスターの件で御世話になりました。みやこさん、卒論中の差入れおいしかったです。ありがとうございます。

研究のストレス解消に魚釣りや、バトミントンに連れて行ってくださったM2の田中さん、M1の田中さん、宮本さん、ありがとうございました。また、ストレス解消の卓球の相手をして下さった西野さんにも感謝します。西野さんがアメリカに行かれてから卓球をすることがなくストレス解消の方法が減りました。また、卓球の相手になって下さい。ひろたかさんと大野さんには飲み会で御世話になりました。いつでも飲み会には参加なのでメンバーには必ずいれておいてください。私生活ではいろいろなところに連れて行ってくださった永江さん、竹本さんには感謝します。いい思い出になりました。また、一緒にどこかの町に行きましょう。そして、4年生のみなさん、メンバーがこの6人であったからこそ楽しい研究生生活が過ごせました。みなさんにはとても感謝しています。最後に、高エネルギー宇宙・素粒子実験研究室は私にとって研究のしやすい場であり、居心地のよい場でありました。来年度からは違う環境で研究をするわけですが、決して忘れないでください。

参考文献

- [1] 佐藤文人「気球搭載用硬X線偏光度検出器の基礎性能」、修士論文 山形大学、2004年
- [2] 名古屋大学 Ux 研ホームページ http://www.u.phys.nagoya-u.ac.jp/facilities/xrt_mk_evj.html
- [3] 河本卓也「実験室における偏光硬X線の発生」、卒業論文 広島大学、2002年
- [4] T.Mizuno et al. “Beam test of a prototype detector array for the PoGO astronomical hard X-ray/soft gamma-ray polarimeter” NIMA 540, 158-168 (2005)
- [5] <http://physics.nist.gov/cgi-bin/Xcom/xcom2>
- [6] J.H.Hubbell “Atomic Form Factors, Incoherent Scattering Functions, and Photon Scattering Cross Sections,” J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol.4, No.3, 471-616 (1975)
- [7] W.Heitler, “The Quantum Theory of Radiation,” Oxford Clarendon Press, Oxford, 1954
- [8] 有元誠「気球硬X線偏光計PoGOのシミュレーションによる性能評価」、修士論文 東京工業大学、2006年
- [9] Kanai Yoshikazu,”Performance Evaluation of Phoswich Detector Cell for the Balloon-Borne Astronomical Soft Gamma-Ray Polarimeter PoGOLite”, Master thesis (2007)
- [10] 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」、修士論文 広島大学、2007年
- [11] 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」、修士論文 広島大学、2008年
- [12] T.Mizuno et al. “High Sensitivity Balloon-Borne Hard X-Ray/Soft Gamma-Ray Polarimeter PoGOLite ,”IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record (2007)

- [13] R.Novick, "Stellar and Solar X-ray Polarimeter," *Space Sci. Rev.*18, 389-408, (1974)
- [14] A.Toor and F.D.Seward, "The Crab Nebula as a calibration source for X-ray astronomy," *Astrophys. J.*, 79, 995-999 (1974)