

シミュレーションを用いた IXPE 衛星による広がった天体の X 線偏光解析手法の研究

広島大学理学部物理科学科
高エネルギー・可視赤外天文学
B154908

山本龍哉

主査 水野恒史 副査 両角卓也

2月

概要

X線の偏光観測とは、解析における「次元」が増える事と同じで、磁場や散乱体の幾何学構造、一般相対論効果の検証など、高エネルギー天体における物理現象をより深く解明できると期待される。しかしその観測の難しさから、1970年代のOSO-8衛星以降、10 keV以下の軟X線観測では有意な結果を得られていない。すなわち、「偏光」は、X線観測で得られる「イメージ」、「タイミング」、「エネルギー」と比べて非常に遅れている物理量である。そんな中、NASAのMSFC(マーシャル宇宙飛行センター)とASI(イタリア宇宙機関)によって高感度のX線偏光検出器が開発された。それを搭載したIXPE衛星がアメリカ、イタリア、日本の協力で進められており、2021年打ち上げが予定され、大きな期待が寄せられている。

偏光の解析、特にIXPE衛星のような撮像データの解析は簡単ではなく、打ち上げ前にノウハウを確立・取得する必要がある。そこで本研究では、IXPE衛星での観測シミュレーションを行い、得られたデータから正しい偏光度と偏光方位角を推測するための手法を研究した。まず、IXPEOBSSIMという専用のシミュレーションソフトで、予めエネルギーが分かる点状X線源を入射させてエネルギー分解能や角度分解能を求め、検出効率を、検出器窓材の透過確率、ガス検出器中での吸収確率と比べるなどして、検出器の応答を確認、理解した。その後、点状X線源からの偏光を解析し、偏光度・偏光方位角の解析方法を理解した。図0.1はかに星雲を想定したシミュレーションした結果で、黒い点1つ1つが検出した光子である。最後に今後の展望として、このかに星雲の正しい偏光情報を推測することについて述べる。

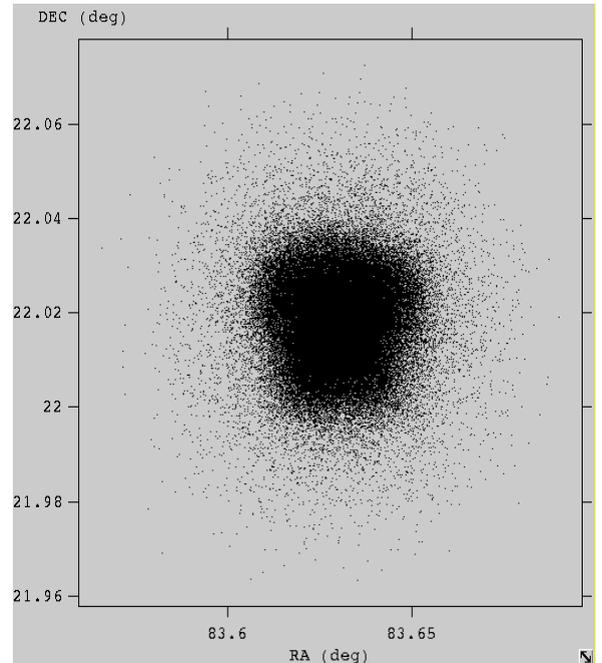


図 0.1 かに星雲の光子図 (縦軸-dec:赤緯。横軸-ra:赤経)

目次

1	序論	4
1.1	高エネルギー天体と X 線偏光観測	4
1.2	本研究の目的	4
2	X 線偏光観測	5
2.1	偏光とは	5
2.2	高エネルギー天体からの X 線放射のメカニズム	7
2.3	X 線偏光観測の物理プロセス	10
2.4	光電子追跡型偏光検出器	12
2.5	過去の X 線偏光観測	14
3	IXPE 衛星	16
3.1	IXPE 衛星の概要	16
3.2	IXPE 衛星によるターゲット	19
4	単色点状 X 線源のシミュレーション	22
4.1	シミュレーターの応答確認	22
4.2	点状 X 線源の偏光解析	35
5	まとめと今後の展望	42
5.1	応答確認のまとめ	42
5.2	ストークスパラメータを用いた解析	42
5.3	実天体を想定したシミュレーション	42

目次

0.1	かに星雲の光子図 (縦軸-dec:赤緯。横軸-ra:赤経)	1
2.1	長軸、短軸が x,y 軸から角度 χ だけ傾いている楕円偏光の様子 [2]	5
2.2	シンクロトロン放射の模式図 [3]	7
2.3	シンクロトロン放射のスペクトル分布。横軸は ν_C/ν [4]	8
2.4	コンプトン散乱 [5]	9
2.5	鉛に対する光子の反応確率 (青い線が光電効果)[6]	11
2.6	光電子の放出角度分布	12
2.7	光電子追跡結果の例 [8]	13
2.8	文献 [9] より転載した、光電子追跡型偏光計による 3.7 keV の X 線に対するモジュレーションカーブ。横軸 (radian)、縦軸 (光子数) である。振幅の最大値が N_{max} 、最小値が N_{min} である [9]	14
2.9	OSO-8 衛星の外観 [12]	15
2.10	グラフィット結晶パネル [13]	15
3.1	IXPE 衛星の概略図 [14]	16
3.2	SRG 衛星の望遠鏡。IXPE 衛星にはこれに似たものを搭載する [16]	17
3.3	焦点面ガス検出器 (GDP)[17]	17
3.4	3.7 keV における吸収点と、軌跡の始点終点を表した GDP による電子軌跡 [18]	18
3.5	ガス電子増幅フォイル (GEM) の仕組み	19
3.6	IXPEOBSSIM の内部構造の概要 [20]	19
3.7	IXPE 衛星によるターゲットリスト [21]	21
4.1	3 keV におけるコンフィグレーションファイル (ファイル名は toy-point-source)。ra0、dec0 で天体の赤経・赤緯を表し、ra1、dec1 で望遠鏡の赤経・赤緯を表している	23
4.2	3 keV の単色 X 線を作る ascii ファイル。左のカラムがエネルギー、右のカラムがエネルギーあたりのフラックス	24
4.3	fv で確認した 3 keV の光子の情報	24
4.4	3 keV のシミュレーション出力より作成した、エネルギー分解能を調べるためのデータファイル。左のカラムがイベント番号で右のカラムがエネルギー (keV) である	26
4.5	2 keV のフィッティング。フィットパラメータも示す	26
4.6	3 keV のフィッティング。フィットパラメータも示す	27
4.7	8 keV のフィッティング。フィットパラメータも示す	27
4.8	1 keV のフィッティング。フィットパラメータも示す	28
4.9	エネルギー分解能	28
4.10	両対数グラフでのエネルギー分解能	29
4.11	有効面積-両対数グラフ	30

4.12	Be 窓の透過確率-両対数グラフ	31
4.13	He(20 %) と DME(80 %) の混合ガスにおける吸収確率-両対数グラフ	31
4.14	Be 窓の透過確率 (橙) とガスの吸収確率 (青)[24]	32
4.15	赤経方向へ +0.09 ° にした、2keV の点源の像	33
4.16	2 keV の正規分布関数。ピークの高さが足りていないことが分かる	33
4.17	裾とピークを組み合わせた正規分布関数。片対数表示にしてある	33
4.18	視野中心での 2 keV の入射角に対する角度応答。横軸は半径 $R(= \sqrt{(RA)^2 + (DEC)^2})$ で縦軸はイベント数	34
4.19	Half Power Diameter を得るため、図 4.18 を積分表示にしたもの	34
4.20	シミュレーションで得られたモジュレーションファクター μ_{100}	36
4.21	IXPE で期待されるモジュレーションファクター μ_{100} [27]	36
4.22	2 keV の偏光度 100 %、偏光方位角 45 ° のヒストグラムへのフィッティング結果	36
4.23	2 keV の偏光度 100 %、偏光方位角 90 ° のヒストグラムへのフィッティング結果	36
4.24	2keV で偏光方位角を変えた時のヒストグラムへのフィッティング結果。見やすいようにヒストグラムを除いている	37
4.25	偏光度 20 % の 2 keV の点源で 100000 秒シミュレーション結果	38
4.26	偏光度 20 % の 8 keV の点源で 100000 秒シミュレーション結果	38
4.27	偏光度 2 % の 2 keV の点源で 100000 秒シミュレーション結果	38
4.28	偏光度 2 % の 8 keV の点源で 100000 秒シミュレーション結果	38
4.29	2 keV の設定した偏光度と計算した偏光度の関係 ($y=x$ からどれだけ離れているかの確認)	39
4.30	8 keV の設定した偏光度と計算した偏光度の関係 ($y=x$ からどれだけ離れているかの確認)	39
4.31	2 keV で偏光度 0 %、方位角 30 度に設定したモジュレーション。ビン幅 20	40
4.32	8 keV で偏光度 0 %、方位角 30 度に設定したモジュレーション。ビン幅 20	40
5.1	X 線で見たかに星雲 [29]	43
5.2	かに星雲を fv で見た図	43
5.3	可視光で見た場合の偏光マップ [31]	43

表目次

1	シミュレーション出力の主なカラムとその意味	25
2	2,8 keV で 100000 秒シミュレーションした際の偏光度	39
3	2 keV で偏光度 0 %, 方位角を 0,30,45,60,90 と変えた時	40
4	8 keV で偏光度 0 %, 方位角を 0,30,45,60,90 と変えた時	40

1 序論

1.1 高エネルギー天体と X 線偏光観測

X 線天文学は、可視光の $10^3 \sim 10^5$ 倍程度以上の高いエネルギーを持つ X 線で宇宙を観測する学問であり、パルサー (高速回転する中性子星)、ブラックホール候補天体、活動銀河核 (銀河の中心にある極めて明るい超巨大ブラックホール) など極限状態にある天体を作る高エネルギー現象を明らかにしてきた。

偏光は天体の磁場や幾何学構造の非一様性によって作られ、天体から発せられる X 線は、すべて程度は違えど、偏光していると考えられる。従って偏光を探ることは、中性子星の超強磁場の形状、ブラックホール近傍での降着円盤や時空の構造、衝撃波面での磁場の構造や乱雑さなどを探る手段として期待されている。しかし、十分な光子統計が必要なこと、感度の良い X 線偏光検出器を製作するのが技術的に困難であったことから、X 線の偏光の観測は可視光などに比べて大きく遅れを取っている。

1970 年代にブラッグ散乱タイプの偏光計を搭載した OSO-8 衛星が打ち上げられ、いくつかの天体に対して偏光観測を行ったが、明るくて大きな偏光度を示すかに星雲のみしか有意な結果を得られなかった。その後、1993 年に NASA の MSFC (マーシャル宇宙飛行センター) のグループが光電効果を利用したガスイメージング偏光計の原理を確立させ、さらに 2001 年に ASI (イタリア宇宙機関) が最新のマイクロピクセル検出器の技術を組み合わせたことで、より高感度の X 線偏光計を完成させた。

この光電吸収型の X 線偏光検出器を搭載した IXPE 衛星は MSFC と ASI が中心となり、日本も参加して進めている計画で、2021 年の 4~5 月に打ち上げが予定されている。ブラックホール候補天体、パルサー、マグネクターなどの点源だけでなく、超新星残骸、活動銀河核からのジェットなど、広がった天体にもイメージングを行いながら偏光を観測できるように高エネルギー天体の理解を大きく進めることができると期待されている。

1.2 本研究の目的

この卒業論文の枠を超えた研究の最終的な目標は、2021 年に打ち上げ予定の IXPE 衛星で、広がった天体の偏光を観測、解析し、磁場の向きや幾何学的構造を明らかにすることである。しかし、一般に広がった天体の解析は難しい。偏光解析となればなおさらである。そこで上記の目標のために、IXPE 衛星による観測の疑似データを作るシミュレーターを動かして、データ解析のノウハウを貯めること、またエネルギー分解能や角度分解能などが有限であるために、画像、エネルギー、偏光情報 (偏光方位角および偏光度) がなまされた取得データから、正しい偏光情報を推測する方法を探ることを卒業研究での目的としている。

またノウハウを貯めるためにはまずシミュレータの使い方や装置の応答を理解する必要があり、卒業研究の前半部分ではシミュレーターのインストールから始まり、点状 X 線を入射させた際の装置の応答を確認した。また後半部分では、点状 X 線の偏光解析手法と、偏光解析時の装置の応答を確認した。

2 X線偏光観測

2.1 偏光とは

電磁波は、電場と磁場の横波であり、電場と磁場は互いに直行し、ともに光 (X 線) の進行方向に垂直である。電場ベクトルと X 線の伝播ベクトルなす平面を「振動面」と呼ぶ。この振動面の分布が一様でないものを「偏光した光 (X 線)」という。以下、文献 [1] に沿って、偏光、特にストークスパラメータについて説明する。

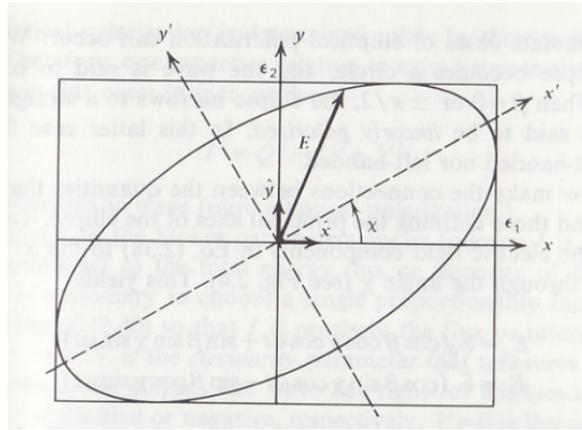


図 2.1 長軸、短軸が x, y 軸から角度 χ だけ傾いている楕円偏光の様子 [2]

図 2.1 は z 軸方向に進み、軸の一つが x 軸に対して角度 χ だけ傾いた楕円偏光における電場ベクトル \mathbf{E} の様子を表している。この \mathbf{E} は一般に、 x 軸、 y 軸方向の単位ベクトルをそれぞれ \hat{x} 、 \hat{y} 、電場ベクトルの成分をそれぞれ E_1 、 E_2 として

$$\mathbf{E} = (\hat{x}E_1 + \hat{y}E_2)e^{-i\omega t} \equiv \mathbf{E}_0 e^{-i\omega t} \quad (2.1)$$

であり、 \mathbf{E}_0 の成分 E_1 、 E_2 は実数 $\epsilon_1, \phi_1, \epsilon_2, \phi_2$ を用いて、

$$E_1 = \epsilon_1 e^{i\phi_1}, E_2 = \epsilon_2 e^{i\phi_2} \quad (2.2)$$

と書ける。ここで ω は電磁場の角振動数であり、 t は時刻を表す。 \mathbf{E}_0 の実数部分の \hat{x} 、 \hat{y} に沿った成分は

$$E_x = \epsilon_1 \cos(\omega t - \phi_1), E_y = \epsilon_2 \cos(\omega t - \phi_2) \quad (2.3)$$

である。次に、 x 軸に対して χ だけ傾いた x' 、 y' 軸方向の成分を考えると

$$E'_x = \epsilon_0 \cos \beta \cos \omega t, E'_y = -\epsilon_0 \sin \beta \sin \omega t \quad (2.4)$$

となる。式 2.4 を x, y の座標系に戻すと、

$$E_x = \varepsilon_0(\cos \beta \cos \chi \cos \omega t + \sin \beta \sin \chi \sin \omega t), E_y = \varepsilon_0(\cos \beta \sin \chi \cos \omega t - \sin \beta \cos \chi \sin \omega t) \quad (2.5)$$

であり、式 2.3 を用いると、

$$\varepsilon_1 \cos \phi_1 = \varepsilon_0 \cos \beta \cos \chi \quad (2.6)$$

$$\varepsilon_1 \sin \phi_1 = \varepsilon_0 \sin \beta \sin \chi \quad (2.7)$$

$$\varepsilon_2 \cos \phi_2 = \varepsilon_0 \cos \beta \sin \chi \quad (2.8)$$

$$\varepsilon_2 \sin \phi_2 = -\varepsilon_0 \sin \beta \cos \chi \quad (2.9)$$

となり、式 2.1 で導入した電場を記述する 4 つの量、 ε_1 、 ϕ_1 、 ε_2 、 ϕ_2 は ε_0 、 β 、 χ という 3 つの量で表せることが分かる。ここで物理的意味が明確な量として、以下のストークスパラメータを導入する。

$$I \equiv \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 = \varepsilon_0^2 \quad (2.10)$$

$$Q \equiv \varepsilon_1^2 - \varepsilon_2^2 = \varepsilon_0^2 \cos 2\beta \cos 2\chi \quad (2.11)$$

$$U \equiv 2\varepsilon_1\varepsilon_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) = \varepsilon_0^2 \cos 2\beta \sin 2\chi \quad (2.12)$$

$$V \equiv 2\varepsilon_1\varepsilon_2 \sin(\phi_1 - \phi_2) = \varepsilon_0^2 \sin 2\beta \quad (2.13)$$

式 2.10 ~ 式 2.13 より、3 つの独立な量 ε_0 、 β 、 χ は

$$\varepsilon_0 = \sqrt{I} \quad (2.14)$$

$$\sin 2\beta = \frac{V}{I} \quad (2.15)$$

$$\tan 2\chi = \frac{U}{Q} \quad (2.16)$$

であり、 $I^2 = Q^2 + U^2 + V^2$ の関係があることが分かる。

I は正の値を取り、電磁波の強度に比例している。 V は電場ベクトルの回転の仕方を表すパラメータで、正の値で、電磁波の進行方向から見て右回り (時計回り)。負の値で左回りの楕円偏光であることを表す。また $V = 0$ の時、直線偏光である。 Q 、 U は x 軸に対する楕円の傾きを表す。直線偏光であれば偏光ベクトルの x 軸に対する傾きとなる。また $Q = U = 0$ で円偏光を表す。

以上は完全に (100 %) 偏光している楕円偏光 (またはその特別な場合としての円偏光や直線偏光) の場合であり、実際には無偏光な成分を持つ。つまり、 $I \geq I_{\text{pol}} = \sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}$ となる。そこで偏光度 II を全強度と偏光部分の強度の比によって次式のように表す。

$$\Pi \equiv \frac{I_{\text{pol}}}{I} = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I} \quad (2.17)$$

直線偏光のとき、偏光面に平行 (x' 軸方向) に偏光フィルターを置いた時最大強度が得られ、偏光面に垂直 (y' 軸方向) にした時最小強度が得られる。無偏光成分の強度は x' 軸及び y' 軸方向に分けられるので、次の関係式が成り立つ。

$$I_{\text{max}} = \frac{1}{2} I_{\text{unpol} + I_{\text{pol}}} \quad (2.18)$$

$$I_{\text{min}} = \frac{1}{2} I_{\text{unpol}} \quad (2.19)$$

ここで、 $I_{\text{unpol}} = I - \sqrt{Q^2 + U^2}$ で、 $I_{\text{pol}} = \sqrt{Q^2 + U^2}$ である。ゆえに式 2.17 から偏光度は

$$\Pi = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}} \quad (2.20)$$

となる。

2.2 高エネルギー天体からの X 線放射のメカニズム

高エネルギー天体は、高温のプラズマや相対論的な高いエネルギーの粒子 (宇宙線) を作り出し、プラズマ自身が熱的放射をしたり、宇宙線が周りの磁場や物質と反応して X 線が生じたりする。以下に代表的な放射プロセスを述べる。この節も文献 [1] に従い、cgs ガウス単位系を用いる。

2.2.1 シンクロトロン放射

シンクロトロン放射とは、相対論的なエネルギーを持つ荷電粒子 (速度 \vec{v} , 電荷 $-e$) が、磁場 \vec{B} によりローレンツ力 ($-\frac{e}{c} \vec{v} \times \vec{B}$) を受けて螺旋運動をした際に生じる放射のことである。相対速度は光速 c との比 β を用いて $v = c\beta$ と書け、この相対速度が真空中の光速に近い時、すなわちローレンツ因子 $\gamma \equiv \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$ が大きい時、ビーミング効果から運動方向に放射が集中し、磁場と垂直の方向に強い偏光を示す。図 2.2 において磁場は裏から表に向かっており、電子は円状に運動し、ビーミングにより 1 から 2 の間でのみ観測者に放射が届く。この時の角直径 $\Delta\theta$ の半値は $1/\gamma$ で表される。

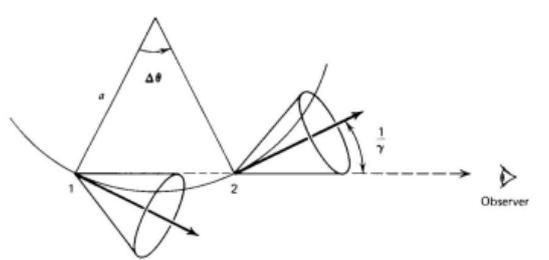


図 2.2 シンクロトロン放射の模式図 [3]

磁場 B 中の荷電粒子 (質量 m) の螺旋運動の角振動数は $\omega_B = \frac{qB}{\gamma mc}$ であり、この ω_B とピッチ角 α (電子の進行方向と磁場のなす角) を用いて、シンクロトロン放射の臨界振動数 ν_c は $\nu_c \equiv \frac{3}{4\pi} \gamma^3 \omega_B \sin \alpha$ 、また臨界角振動数 ω_c は $\omega_c \equiv \frac{3}{2} \gamma^3 \omega_B \sin \alpha$ で定義される。放射スペクトルはこの臨界振動数でカットオフを持つ。詳しい計算によると図 2.3 のようになり、ピークの位置は $0.29\nu_c$ である。

実際の天体からのシンクロトロン放射は、高エネルギー電子の集団から放射されるため、電子のエネルギー分布も考慮してスペクトルを求める必要がある。高エネルギー天体における相対論電子のエネルギー分布は、しばしばエネルギー E のべき乗

$$N(E)dE = CE^{-p}dE \quad (2.21)$$

で表される。ここで $N(E)$ はエネルギーが $E - \frac{1}{2}dE$ と $E + \frac{1}{2}dE$ との間にある電子数であり、 p はべき指数、 C は定数である。このとき、この相対論的電子から放射されるシンクロトロン放射のエネルギーフラックス F_ν (放射により単位時間、単位面積、単位振動数を通過するエネルギー) は、

$$F_\nu \propto \nu^{-\alpha} \quad (2.22)$$

の形のべき乗の分布で、 α は、

$$\alpha = \frac{p-1}{2} \quad (2.23)$$

となる。粒子数フラックスの場合は $F_\nu \propto \nu^{-\alpha'}$ として α' は、

$$\alpha' = \frac{p+1}{2} \quad (2.24)$$

で表せる。

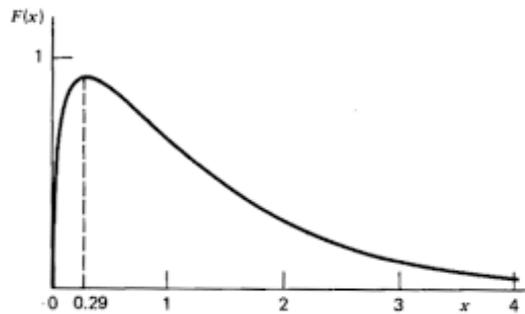


図 2.3 シンクロトロン放射のスペクトル分布。横軸は $\nu_c/\nu[4]$

また、シンクロトロン放射の偏光度 Π の最大値は式 2.21 の電子のエネルギーのべき指数 p を用いて、

$$\Pi = \frac{p+1}{p+\frac{7}{3}} \quad (2.25)$$

で表される。 p の値は一般に 2~3 程度で $\Pi \sim 75\%$ と高い偏光度を取りうる事が分かる。また磁場の向きに垂直に直線偏光するため、偏光の観測 (偏光度および方位角) から磁場の向きや整列度といった幾何学的構造が分かる。従って、パルサーやパルサー星雲、超新星残骸 (SNR)、活動銀河核 (AGN) における粒子加速の解明が期待される。

2.2.2 コンプトン散乱

コンプトン散乱とは、入射 X 線と物質中の電子との間で起こる相互作用であり、高エネルギー天体ではブラックホール周りの降着円盤による散乱成分などとして観測される。素過程は図 2.4 に示され、左側から入射した X 線がエネルギーの一部を電子に与え、角度 φ で電子を弾き飛ばすと同時にエネルギーが小さくなった X 線が角度 θ で散乱される。コンプトン散乱の確率は電子の数に依存するため、原子番号とともに増加する。また、反跳電子と散乱 X 線のエネルギーの関係式は、運動量保存則、エネルギー保存則から求められる。

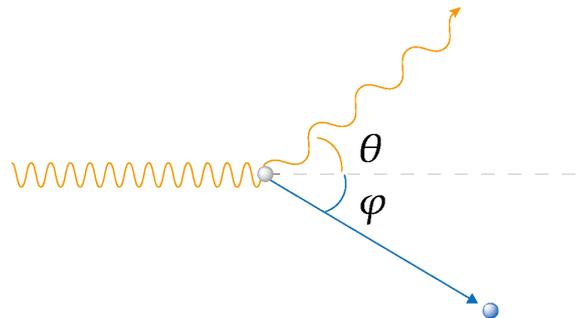


図 2.4 コンプトン散乱 [5]

入射 X 線のエネルギーを $h\nu$ 、反跳電子のエネルギーを E 、散乱 X 線のエネルギーを $h\nu'$ とすると

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (2.26)$$

$$E = h\nu - h\nu' = h\nu \frac{\frac{h\nu}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)}{1 + \frac{h\nu}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (2.27)$$

$$\frac{1}{\tan \varphi} = \left(1 + \frac{h\nu}{m_e c^2}\right) \tan \frac{\theta}{2} \quad (2.28)$$

が得られる。また、コンプトン散乱由来の偏光は散乱面の法線に垂直な偏光となる。偏光角から散乱体の形状や見込み角を制限できるために、ブラックホール連星の降着円盤の幾何学的構造を制限することが期待される。

2.3 X線偏光観測の物理プロセス

2.3.1 ブラッグ反射

ブラッグ反射とは、結晶による散乱において光路差が波長の整数倍の時に光が強められる現象である。結晶面の間隔 d 、光子の結晶への入射角 θ 、光子の波長 λ 、整数 n を用いて

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (2.29)$$

の際に光が強められる。このブラッグ反射を用いた偏光計が OSO-8 衛星に搭載され、かに星雲からの X 線偏光を検出した。

2.3.2 光電効果

光電効果とは、入射光子が吸収物質の原子核に束縛されている電子に衝突し、光電子を放出させて入射光子自体は消滅する相互作用である。内殻電子を放出する確率が高く、多くの場合 K 殻電子が放出される。エネルギー $h\nu$ の光子によって発生する光電子のエネルギー E は、電子の結合エネルギーを W として、 $E = h\nu - W$ で表される。光電効果の反応断面積は、 σ_T をトムソン散乱の反応断面積とし、 Z を原子番号、 m_e を電子の質量、 c を光速、 $m_e c^2$ を電子の静止質量エネルギー (0.511 MeV) とすると、

$$\sigma_{ph} \approx \sigma_T 4\sqrt{2} \left(\frac{1}{137}\right)^4 Z^5 \left(\frac{m_e c^2}{h\nu}\right)^{\frac{7}{2}} \quad (2.30)$$

で表され、原子番号が大きいほど、また入射光子のエネルギーが小さいほど光電効果が起きやすい。図 2.5 の青いグラフは鉛の光電効果を表しており、0.1 MeV より右側では K 殻電子と光電効果が起こる確率を表す。0.1 MeV より左の鋭くなって落ち込んだ部分は K 殻の反応確率から L 殻への反応へ移った時を表している。

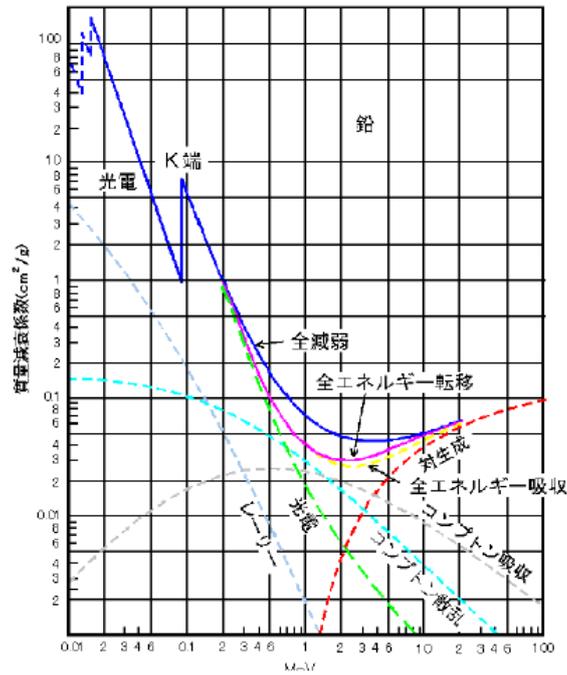


図 2.5 鉛に対する光子の反応確率 (青い線が光電効果)[6]

光電子の速度 v とし、光速との比を $\beta = \frac{v}{c}$ とする。また入射光子の進行方向と光電子の射出方向のなす角を θ とし、入射光子の電場ベクトルと光電子の放出方向のなす角を ϕ とすると、散乱角度の断面積は

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \phi}{(1 - \beta \cos \theta)^4} \quad (2.31)$$

という関係で表される。 $\cos^2 \phi$ が光電子の射出方向の方位角依存性を表し、図 2.6 のハッチ模様の部分はこの断面積を模式的に表したものであり、光電子は入射光子の電場ベクトル方向に放出されやすい。式 2.31 と図 2.6 から、光電子の射出方向を測ることができれば、入射 X 線の偏光方向を測定できることが分かる。

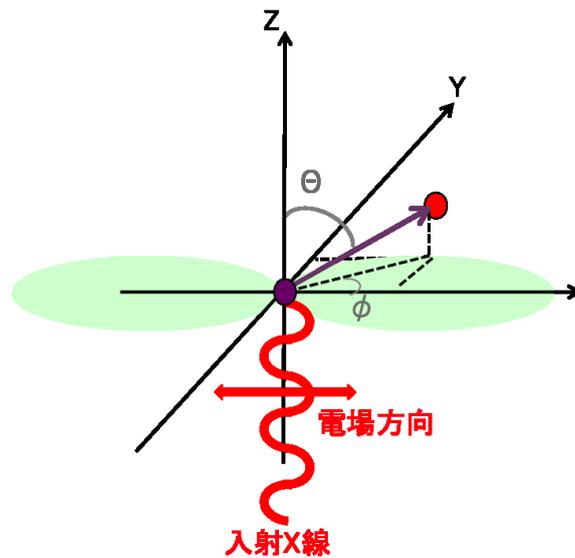


図 2.6 光電子の放出角度分布

2.3.3 コンプトン散乱

コンプトン散乱とは 2.2.2 で述べたように入射 X 線が電子と衝突することで散乱する現象である。入射 X 線の電場ベクトルに対する散乱方位角を ϕ とするとその角度分布は一様ではなく、その分布 (散乱断面積の方位角 ϕ への依存性) は

$$\frac{d\sigma_c}{d\Omega} = \frac{1}{2} r_e^2 \left(\frac{h\nu'}{h\nu} \right)^2 \left(\frac{h\nu}{h\nu'} + \frac{h\nu'}{h\nu} - 2 \sin^2 \theta \cos^2 \phi \right) \quad (2.32)$$

という式 (Kline-Nishina の式) で表される [7]。この式から分かるように、散乱 X 線の偏光ベクトルに対して垂直方向に散乱が起きやすく、この性質を用いて偏光を測ることができる。

2.4 光電子追跡型偏光検出器

IXPE 衛星に搭載される検出器は光電効果を利用した検出器である。ここでは主に光電子追跡型偏光検出器について簡単に述べるとともに、偏光観測でよく使う量として最小偏光検出感度及びモジュレーションファクターを導入する。IXPE 衛星搭載装置の詳細は 3.1.3 で再び述べる。

2.4.1 検出器の仕組み

検出器中にガスを封入し、そのガスと入射 X 線による光電効果を利用している。図 2.6 より、光電子の射出方向を推定することで入射 X 線の偏光情報を取得できる。

図 2.7 は文献 [8] に掲載されている、IXPE 衛星に搭載される検出器を開発した、イタリアのグループの実験による光電子跡のイメージ例で、54 keV の X 線によるものである。検出器のガスは 2 気圧で、アルゴン (90 %)、メタン (5 %)、トリメチルアミン (5 %) の混合となっている。光電子跡の大きさは 14 mm で右上の跡は

最初のイオン化によって生成されたオージェ電子 (内殻電子が励起された原子から放出される、特定のエネルギーを持った電子) によるものである。図の中央付近が X 線の吸収位置 (光電子の射出位置) であり、概ね下方方向に光電子が射出され、最後に電子が止まる際に大きなエネルギーデポジットをする (電子雲が大きく、また濃くなる) 様子が分かる。この電子雲のイメージから最初の光電子の射出方向を再構成し、偏光を測ることができる。



図 2.7 光電子追跡結果の例 [8]

2.4.2 モジュレーションファクター

モジュレーションファクターとは偏光検出器能力を表す量である。検出器の応答により、100 %に直線偏光した X 線を入射しても理想的な異方性を測定できるわけではない。例えば光電効果では式 2.31 にあるように、真の射出方向は偏光ベクトルの方向が最大、それと垂直な方向は 0 であるが、実際の検出器では射出方向を「推測」しており、垂直方向にも有限な出力が得られてしまう。

図 2.8 は文献 [9] に掲載されている、「測定」した角度の分布で、モジュレーションカーブと呼ばれる。既知の値としての、装置のモジュレーションファクター μ_{100} は、100 %偏光を入射させた際の振幅が最大値となる応答の最大強度 N_{max} と、振幅が最小となる最小強度 N_{min} から以下のように定義される。

$$\mu_{100} = \frac{N_{max} - N_{min}}{N_{max} + N_{min}} \quad (2.33)$$

天体からの偏光を観測し、得られたモジュレーションファクターを μ と定義すると、観測天体の偏光度 $P.D.(\%)$ は、

$$PD = \frac{\mu}{\mu_{100}} \times 100 \quad (2.34)$$

で求めることができる。

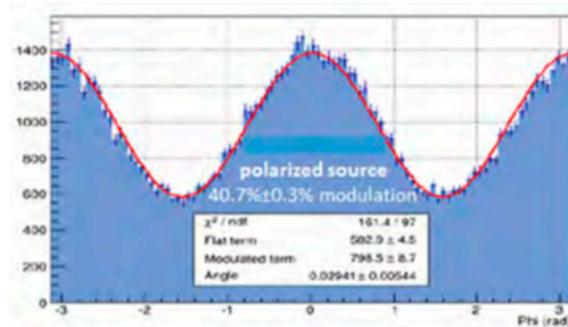


図 2.8 文献 [9] より転載した、光電子追跡型偏光計による 3.7 keV の X 線に対するモジュレーションカーブ。横軸 (radian)、縦軸 (光子数) である。振幅の最大値が N_{max} 、最小値が N_{min} である [9]

2.4.3 最小偏光検出感度 (MDP_{99})

最小偏光検出感度 (Minimum Detected Polarization:MDP) とは、検出器がどれだけ小さい偏光を検出可能か表すものであり、

$$MDP_{99}(\%) = \left[4.29 \times \frac{100}{\mu_{100}} \right] \times \left[\frac{1}{R_S t} \times \frac{R_S + R_B}{R_S} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.35)$$

で表される [10]。t は観測時間を表し、 R_S は天体のカウントレートで、 R_B はバックグラウンドのカウントレートである。 MDP_{99} は統計的に、99 %の信頼度で無偏光と区別できる最小の偏光度を表している。

2.5 過去の X 線偏光観測

1970 年代に打ち上げられた OSO-8 衛星は、ブラッグ散乱タイプの偏光計を搭載しており、90 %近い高いモジュレーションファクターを持っていた一方で、2.6 keV, 5.2 keV という特定のエネルギーにしか感度を持たず、またイメージングもできなかった。結果として有意な結果が得られたのは明るくて大きな偏光度を示す「かに星雲」のみであった。X 線は波長が短いため、波動性よりも粒子性が顕著に現れる。そのため偏光計製作が技術的にも困難であり、OSO-8 衛星以降、10 keV 以下の X 線偏光の有意な観測はない。

かに星雲については、シンクロトロン放射であることを明らかにし、2.6 keV で 19.2 % \pm 1.0 %、5.2 keV で 19.5 % \pm 2.8 % の偏光度を観測できた [11]。図 2.9 は OSO-8 衛星の外観で、図 2.10 のグラフィット結晶パネルで光路差の整数倍で強めあった光を観測していた。

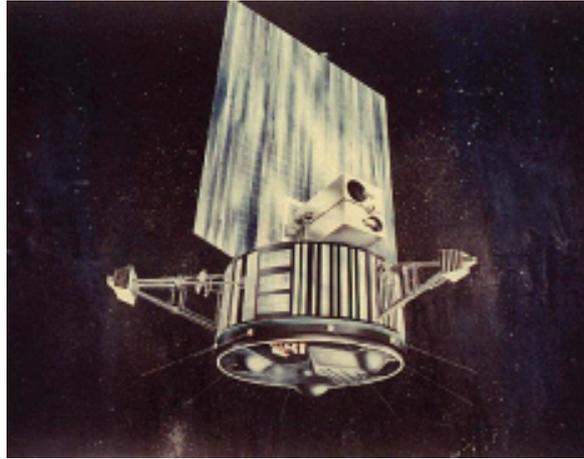


図 2.9 OSO-8 衛星の外観 [12]

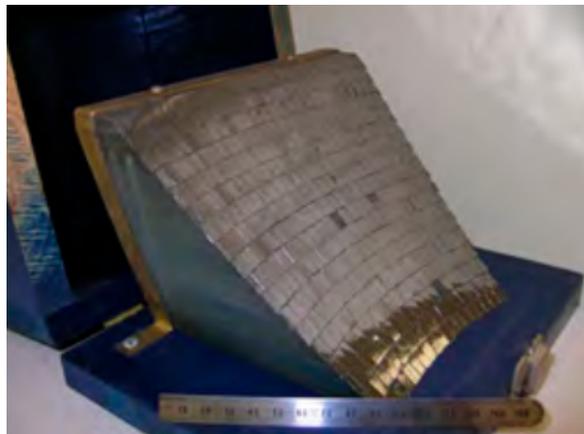


図 2.10 グラファイト結晶パネル [13]

3 IXPE 衛星

この章では、2021年に打ち上げが予定されており、X線偏光観測の強力な手段として期待される、Imaging X-ray Polarimetry Explorer (IXPE 衛星) について述べる。

3.1 IXPE 衛星の概要

3.1.1 IXPE 衛星とは

IXPE 衛星の計画責任者は OSO-8 衛星でかに星雲の偏光を観測した、NASA/MSFC の Martin Weisskopf 博士であり、50名程度のメンバーによって実施されるプロジェクトである。NASA の SMEX ミッションとして、アメリカ、イタリア、日本の国際協力で進められている。

1993年に NASA の MSFC によりガスイメージング偏光計の原理が確立された。その後、イタリアの ASI が最新のマイクロピクセル検出器の技術を組み合わせ、より高感度の X 線偏光計を 2001年に完成させた。

NASA/MSFC で開発された X 線望遠鏡 3 台と、ASI で開発されたガスイメージング偏光計 3 台を組み合わせた X 線偏光観測衛星として計画されたのが IXPE 衛星である。その概略図(想像図)が図 3.1 であり、望遠鏡と検出器は約 4m 離れて配置される。日本からは焦点面検出器内のガス電子増幅フォイル (GEM) と X 線望遠鏡のサーマルシールドという、検出器のハードウェアが提供される。観測できるエネルギー帯は 2~8keV で、X 線の偏光情報、エネルギー、タイミング、イメージのすべての情報を得られることが最大の特徴となっている。望遠鏡の視野は 12.9 分角 × 12.9 分角であり、多くの広がった X 線源に対して十分な広さを持つ。

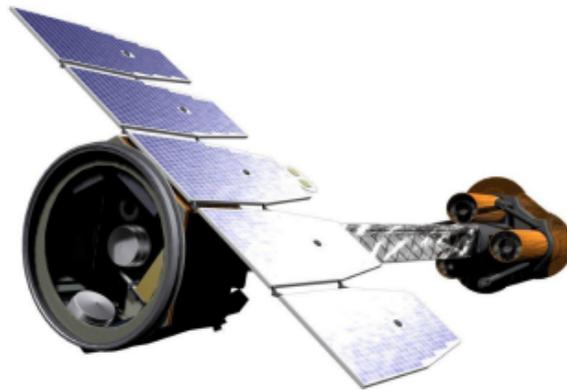


図 3.1 IXPE 衛星の概略図 [14]

3.1.2 X 線望遠鏡

IXPE 衛星の X 線望遠鏡は 1990 年代の初期に MSFC が開発、改良した、ニッケル・コバルトでできたフルシェルの Wolter-1 というミラーである。3つのミラーと1つの予備ミラーがあり、合計 96 のミラーシェルからなる。有効面積は 3~6 keV で約 250cm²[15] である。図 3.2 は、ロシア主導の Spectrum-Rentogen-Gamma(SRG) 衛星の望遠鏡である。IXPE 衛星にはこれによく似た望遠鏡が搭載される。

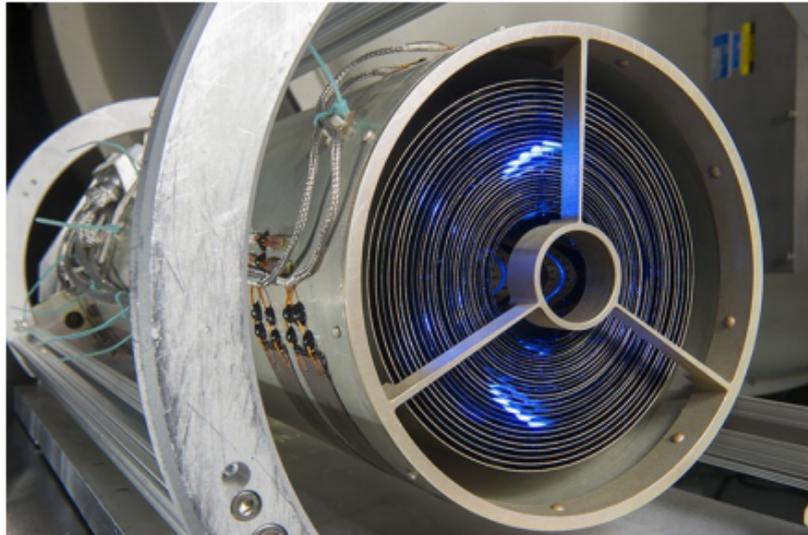


図 3.2 SRG 衛星の望遠鏡。IXPE 衛星にはこれに似たものを搭載する [16]

3.1.3 焦点面ガス検出器

IXPE 衛星に搭載される検出器は光電効果を利用した焦点面ガス検出器 (Gas Pixel Detectors:GDP) である。その仕組みを図 3.3 に示す。厚さ $50\ \mu\text{m}$ の Be の窓から入射した X 線が、He-20 %,DME-80 %が 1 気圧で封入された、厚さ 1 cm、面積 $1.5\text{cm}\times 1.5\text{cm}$ の検出空間で光電吸収を起こし、光電子が放出される。図 3.4 は $3.7\ \text{keV}$ における 2 次電離ガスの位置のイメージ図である。この放出方向の頻度分布を用いることで偏光の解析ができる。詳しくは 4.2.1 で述べる。

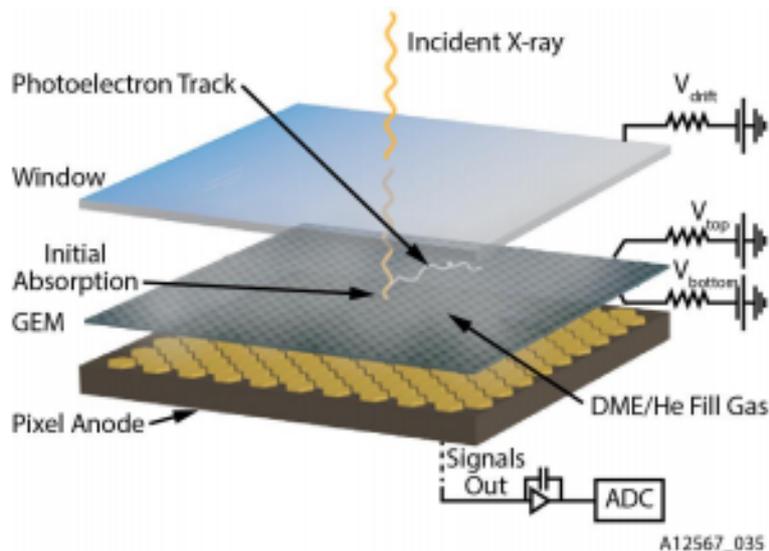


図 3.3 焦点面ガス検出器 (GDP)[17]

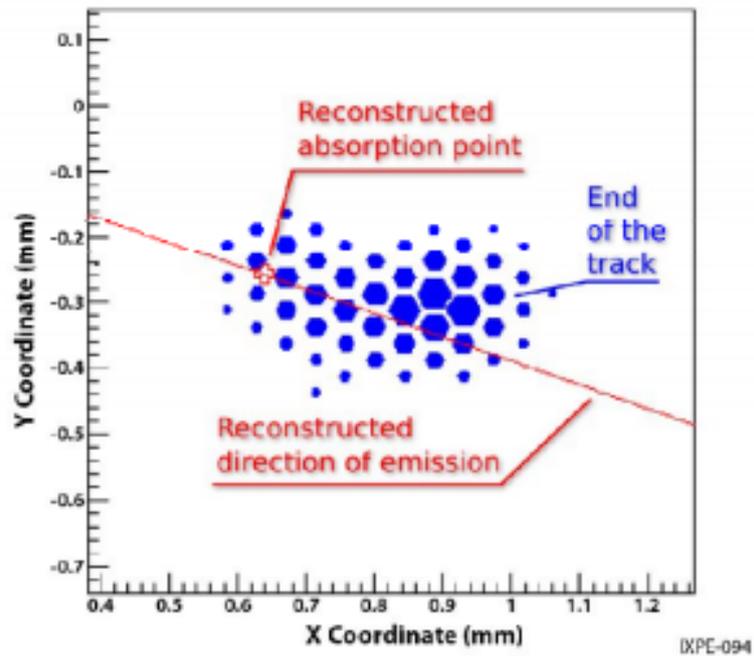


図 3.4 3.7 keV における吸収点と、軌跡の始点終点を表した GDP による電子軌跡 [18]

光電子は、図 3.5 に示すように、ガス電子増幅フォイル (Gas Electron Multiplier:GEM) で増幅される。

GEM は 110 mm×90 mm の大きさで、穴径 $30\mu\text{m}$ の穴が、 $50\mu\text{m}$ の間隔で空いており、そこに電場を生じさせて加速させることで衝突を繰り返す。その後読み出し部分のピクセルアノードへ到達する。ピクセルアノードは $50\mu\text{m}$ の大きさの六角形で、数は 300×352 個ある。それぞれが電気信号の読み出し部分に繋がっている [19]。また GEM で増幅された電子は数千倍にもなり、ノイズと分離しやすくなる。

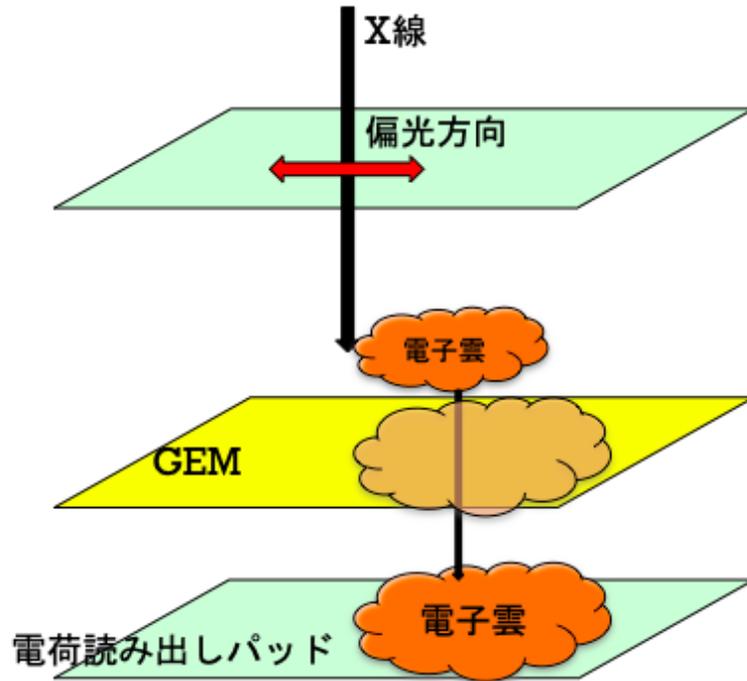


図 3.5 ガス電子増幅フォイル (GEM) の仕組み

3.1.4 IXPEOBSSIM

IXPEOBSSIM とは、IXPE チームが開発している、IXPE 衛星によって観測されたデータを解析するための専用のシミュレーションソフトウェアである。Python3.7 が動作させるために必要であり、その他のライブラリも用意するため、anaconda3 というオープンソースを事前にインストールすることが推奨されている。図 3.6 は IXPEOBSSIM の内部構造で、左側の [Source model] で観測する天体のデータを設定する。また [Response function] では実際に観測した場合の、予想される検出器応答が設定されており、それを加味して [xpobssim] でシミュレーションをする。結果が [Photo list] に反映され、天文学で標準となっている FITS というファイル形式で保存される。これは HeaSoft という X 線天文学の標準的な解析フレームワークで中身を確認できる。

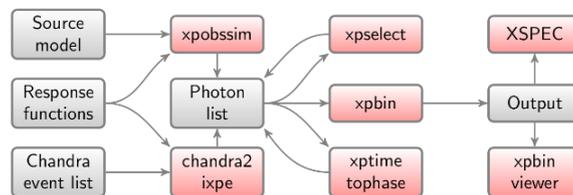


図 3.6 IXPEOBSSIM の内部構造の概要 [20]

3.2 IXPE 衛星によるターゲット

1~5 の天体を IXPE 衛星での代表的な観測ターゲットとしている。

1. かに星雲・かにパルサー

1054年に爆発した超新星で作られたパルサーが「かにパルサー」、それにより作られたパルサー風星雲が「かに星雲」である。近年では硬X線、ガンマ線領域での偏光が検出されているが、パルサー風雲を空間分解した偏光観測は行われておらず、パルサーの位相ごとの偏光観測も複数のミッションで相容れない結果が報告されている。IXPE衛星の望遠鏡の位置分解能は星雲よりも十分小さく、場所ごとに区切った偏光観測から磁場の向きや、整列度が解析でき、パルサー星雲での粒子加速のメカニズムを解明できると期待される。

また星雲成分をイメージ上で除去してパルサーに対する偏光度を高めることができる。パルサーは位相ごとに偏光度が大きく変動すると考えられ、X線パルスの放射機構の特定に期待される。

2. 超新星残骸 (SNR)

超新星爆発の爆風で衝撃波が生じ、周りのガスを加熱する。こうしてできた高温のガス球が超新星爆発残骸である。また衝撃波は粒子の加速も行う。若い年齢のシェル型SNRのシンクロトロン放射から、磁場の向きと整列度を空間分解して観測することで銀河宇宙線の粒子加速のプロセスの定量化が期待される。

3. 活動銀河核 (AGN) ジェット

銀河の中心には超巨大ブラックホールがあり、強力な電磁波を放出し、活動銀河核 (AGN) と呼ばれる。AGNはしばしば物質の噴流 (ジェット) を伴う。このジェットは空間的に広がった構造を持つため、明るいものに対しては空間分解した偏光観測が可能である。このことにより、ジェットに沿って磁場の向きや整列度がどう変わるかを測定でき、ジェットの生成機構や宇宙線加速機構の解明が期待される。

4. ブラックホール連星

マイクロクェーサーと呼ばれるジェットを伴うブラックホール連星は明るいいため、詳しい偏光観測が可能である。AGNのジェットと同様に、ジェットの理解を進められると期待される。また、マイクロクェーサーの多くは中心のブラックホールが高速回転をしていると考えられる。IXPE衛星はエネルギーごとの偏光度・偏光方位角の違い、ひいてはブラックホールの回転速度による偏光度・偏光方位角の違いを測るのに十分な感度を有する。従って、相対論効果を実証し、またブラックホールの回転を測ることが可能であると考えられる。

5. マグネター

強磁場中性子星が磁気エネルギーを開放して輝くと考えられるマグネターにおいて、電子の運動方向が強く制限される強磁場中では、偏光方向が磁場に対して平行か垂直かで散乱断面積が大きく異なる。また量子電磁力学効果の有無で偏光度は大きく異なる。IXPE衛星での観測からその事実を立証し、マグネターが超強磁場中性子星であるという「マグネター仮説」の検証が可能となると期待される。

図 3.7 に IXPE による観測ターゲットリスト (予定) の一覧を示す。 F_{2-8} は 2~8 keV でのフラックスであり、 MDP_{99} は最小偏光検出感度で、 Δt は想定する観測時間である。上で述べた様々なカテゴリーの天体が観測対象になっていることが分かる。

Source name	F_{2-8} 10 ⁻¹¹ cgs	MDP_{99} %	Δt day	Uncertainty σ_{Π} and σ_{ψ} for representative polarization measurements for indicated number of energy \times time or pulse phase \times spatial bins
Active Galactic Nuclei (AGN)				
Cen A radio galaxy	33.5	0.7	10.9	Core (4 bins) $\Pi \pm 0.5\%$, $\psi \pm 2.8^\circ$ (if $I \approx 5\%$) & Jet (4 bins) $\Pi \pm 1.5\%$, $\psi \pm 4.2^\circ$ (if $I \approx 10\%$)
Mkn 421 blazar	27.2	2.0	1.6	(3 bins) $\Pi \pm 1.1\%$, $\psi \pm 3.3^\circ$ (if $I \approx 10\%$)
Galactic Center				
Sgr B2	0.30	7.5	11.6	(3 bins) $\Pi \pm 4.3\%$, $\psi \pm 2.5^\circ$ (if $I \approx 50\%$), test hypothesis of Sgr A* reflection
Microquasars				
GRS 1915+105	1300.	0.25	2.3	(4 bins) $\Pi \pm 0.2\%$, $\psi \pm 1.0^\circ$ (if $I \approx 5\%$), with energy, measure black-hole spin
Cyg X-3 average	580.	0.4	2.8	(4 bins) $\Pi \pm 0.3\%$, $\psi \pm 1.5^\circ$ (if $I \approx 5\%$); $MDP = 0.7\%$ in low state
Cyg X-1 average	1000.	0.4	0.7	(4 bins) $\Pi \pm 0.3\%$, $\psi \pm 1.5^\circ$ (if $I \approx 5\%$); $MDP = 0.6\%$ in low state
Pulsar-Wind Nebulae (PWNe) + Pulsars (PSR)				
Crab PWNe + pulsar	1950.	0.24	1.6	PWNe (25 bins) $\Pi \pm 0.4\%$, $\psi \pm 0.6^\circ$ (if $I \approx 20\%$), image magnetic structure Pulsar (9 bins) $\Pi \pm 2.6\%$, $\psi \pm 3.7^\circ$ (if $I \approx 20\%$), 34-ms pulse period, PWNe subtracted
Vela PWNe + pulsar	5.2	1.8	11.7	PWNe (18 bins) $\Pi \pm 2.6\%$, $\psi \pm 3.7^\circ$ (if $I \approx 20\%$), image magnetic structure Pulsar (2 bins) $MDP = 19.9\%$, 89-ms pulse period, PWNe subtracted
MSH 15-52 + B1509-58	7.2	1.5	12.3	PWNe (18 bins) $\Pi \pm 2.6\%$, $\psi \pm 3.7^\circ$ (if $I \approx 20\%$), image magnetic structure Pulsar (9 bins) $\Pi \pm 3.1\%$, $\psi \pm 4.4^\circ$ (if $I \approx 20\%$), 151-ms pulse period, PWNe subtracted
Supernova Remnants (SNR)				
Cas A	116.0	0.35	11.6	(48 bins) $\Pi \pm 0.8\%$, $\psi \pm 4.6^\circ$ (if $I \approx 5\%$), image magnetic structure
Magnetars				
4U 0142+61	5.9	2.0	5.4	(9 bins) $\Pi \pm 2.0\%$, $\psi \pm 1.1^\circ$ (if $I \approx 50\%$), 8.7-s pulse period, test vacuum birefringence
Classical Accreting X-ray Pulsars (High-B X-ray Binaries)				
Cen X-3	341.	0.5	2.6	(27 bins) $\Pi \pm 0.9\%$, $\psi \pm 1.2^\circ$ (if $I \approx 20\%$), 4.84-s pulse period
4U 0900-40	574.	0.5	1.5	(27 bins) $\Pi \pm 0.9\%$, $\psi \pm 1.2^\circ$ (if $I \approx 20\%$), 283-s pulse period
Accreting Millisecond X-ray Pulsars & other Low-B X-ray Binaries				
Sco X-1 *0.1 transmission	2250.	0.4	0.34	(5 bins) $\Pi \pm 0.3\%$, $\psi \pm 1.7^\circ$ (if $I \approx 5\%$), with bright-source attenuating filter
Cyg X-2	987.	0.4	1.1	(5 bins) $\Pi \pm 0.3\%$, $\psi \pm 1.7^\circ$ (if $I \approx 5\%$)

図 3.7 IXPE 衛星によるターゲットリスト [21]

4 単色点状 X 線源のシミュレーション

まず、シミュレータの使い方や検出器応答を理解するため、単色で点状 X 線源のシミュレーションを行った。予め位置やエネルギーが決まっており、またフラックス [counts/sec/cm²] の計算が簡単になるため有効面積の導出が簡潔になるなどの利点がある。

4.1 シミュレーターの応答確認

シミュレーターを動かすために、1,1.5,2,2.5,3,3.5,4,5,6,7,8,9,10 keV のエネルギーの平行 X 線を入射させた。IXPEOBSSIM には単色ビームを打つ機能は実装されていないが、任意のスペクトルをテキストファイルで指定することができるので、その機能を用いて擬似的に単色 X 線を入射させた。

4.1.1 シミュレーション方法

3.1.4 で述べた IXPEOBSSIM を用いる。図 4.1 の toy-point-source というコンフィグレーションファイルで天体の位置 (ra0,dec0) や望遠鏡を向ける向き (ra1,dec1)、また偏光度 (pol-deg) と偏光方位角 (pol-ang)、スペクトルのファイル、空間分布などを設定できる。下から 2 行目 (“src=” で始まる行) が実際に X 線源を作成する箇所であり、ここではすでに設定した座標、スペクトル、偏光情報を持った点源を作ってシミュレーションしている。またこの時、エネルギーとフラックスを設定したテキストファイルを読み込んで動作させる必要があり、そのファイルは図 4.2 のような ascii ファイルである。この ascii ファイルには 2 カラムあり、左側がエネルギー [keV] で、右側がそれに対応するフラックス [counts/sec/cm²/keV] となっている。その後 1000 秒間、観測シミュレーションをする。シミュレーターを動かす時は次のコマンドを用いる。

```
xpobssim -configfile [ファイル名.py] -duration [観測時間 (s)]
```

これにより得られるデータは fits 形式のファイルで保存され、HeaSoft 群の fv で図 4.3 のように確認できる。表 1 は各物理量の意味について記した表で、応答確認をする際は、主に TRG-ID、ENERGY、RA(DEC) の値を awk コマンドを用いて切り取り、ROOT に読み込ませる事を行った。

```

__model__ = file_path_to_model_name(__file__)
E0 = 1.0
ra0, dec0 = 0., 0.
ra1, dec1 = 0., 0.
pl_norm = 10.
pl_index = 2.
##spec = power_law(pl_norm, pl_index)
pol_deg = constant(1.0)
pol_ang = constant(numpy.radians(0.))

def parse_spectral_data(file_name, emin=1., emax=10.):
    """Parse the input data for the spectral components.

    The input format is a simple ascii file with two columns:
    * energy [keV]
    * flux [counts / s / cm2 /keV]
    """
    file_path = os.path.join(IXPEOBSSIM_CONFIG_ASCII, file_name)
    logger.info('Reading data from %s...' % file_path)
    energy, flux = numpy.loadtxt(file_path, unpack=True)
    mask = (energy >= emin) * (energy <= emax)
    energy = energy[mask]
    flux = flux[mask]
    fmt = dict(xname='Energy', xunits='keV', yname='Flux',
              yunits='cm$^{-2}$ s$^{-1}$ keV$^{-1}$')
    return xInterpolatedUnivariateSplineLinear(energy, flux, **fmt)

data_spline = parse_spectral_data('3keV.txt')

def spec(E, t):
    return data_spline(E)

src = xPointSource('Point source', ra0, dec0, spec, pol_deg, pol_ang)

ROI_MODEL = xROIModel(ra1, dec1, src)

```

図 4.1 3 keV におけるコンフィグレーションファイル (ファイル名は toy-point-source)。ra0、dec0 で天体の赤経・赤緯を表し、ra1、dec1 で望遠鏡の赤経・赤緯を表している

```

0.0 0
1.0 0
2.0 0
2.9 0
2.95 10
3.0 20
3.05 10
3.1 0
4.0 0
5.0 0
6.0 0
7.0 0
8.0 0
9.0 0
10.0 0
11.0 0
12.0 0
13.0 0
14.0 0
15.0 0
16.0 0

```

図 4.2 3 keV の単色 X 線を作る ascii ファイル。左のカラムがエネルギー、右のカラムがエネルギーあたりのフラックス

Invert	Modify	Modify	Modify	Modify	Modify	Modify	Modify	Modify	Modify	Modify	Modify	Modify	Modify	Modify	Modify	Modify
1	1	7.2494963949218E-02	95	95	3.220000E+00	9.179689E-01	5.969077E-02	4.498140E+01	4.500085E+01	1048	1004	4.188974E-01	4.188974E-01	1.486339E+00	1.338206E+00	
2	2	7.369943310609E-02	90	90	3.020000E+00	3.722923E-01	7.468963E-02	4.499246E+01	4.500107E+01	1020	1004	-1.041031E+00	-1.041031E+00	-1.744292E+00	-9.789621E-01	
3	3	1.503811090895E-01	60	60	3.420000E+00	-4.217142E-01	2.584570E-01	4.500694E+01	4.500370E+01	979	1014	-5.531042E-01	-5.531042E-01	-1.788013E+00	8.961090E-01	
4	4	1.664413402686E-01	37	37	2.500000E+00	-2.972328E-01	1.865454E-01	4.500602E+01	4.500267E+01	985	1010	-3.014303E+00	-3.014303E+00	5.036778E-01	1.939538E+00	
5	5	2.009982189927E-01	46	46	2.860000E+00	7.163793E-02	-2.117763E+00	4.499895E+01	4.496967E+01	1004	891	7.008517E-01	7.008517E-01	1.971476E+00	3.369764E-01	
6	6	2.069484820643E-01	49	49	2.980000E+00	-1.769637E-01	-3.443711E-01	4.500399E+01	4.499207E+01	991	983	-2.521414E+00	-2.521414E+00	1.891800E+00	6.489170E-01	
7	7	2.309853181718E-01	48	48	2.940000E+00	5.140757E-02	-7.010549E-02	4.499896E+01	4.499900E+01	1003	997	-2.022228E+00	-2.022228E+00	1.570208E+00	-1.238727E+00	
8	8	2.538427120238E-01	40	40	2.620000E+00	-2.069914E-01	-1.911014E-01	4.500419E+01	4.499726E+01	990	991	-4.316294E-01	-4.316294E-01	-1.519930E+00	1.299929E+00	
9	9	2.642203707934E-01	49	49	2.980000E+00	-9.293910E-01	6.486644E-01	4.501883E+01	4.500929E+01	953	1034	-2.836504E+00	-2.836504E+00	1.145976E+00	1.639198E+00	
10	10	2.831168243995E-01	45	45	2.820000E+00	6.991130E-02	-3.276621E-02	4.499898E+01	4.499953E+01	1004	999	-2.895604E+00	-2.895604E+00	9.447396E-01	1.762801E+00	
11	11	3.065372111373E-01	58	58	3.340000E+00	-6.749667E-02	5.836278E-01	4.500137E+01	4.500836E+01	997	1031	6.896003E-01	6.896003E-01	1.960294E+00	3.965463E-01	
12	12	3.409624723699E-01	43	43	2.740000E+00	3.407054E-01	1.791274E-01	4.500690E+01	4.500257E+01	983	1010	-1.474364E+00	-1.474364E+00	-3.833421E-01	-1.962918E+00	
13	13	3.449440911928E-01	45	45	2.820000E+00	-2.761611E-02	-6.417095E-01	4.500066E+01	4.499081E+01	999	967	-2.897809E+00	-2.897809E+00	9.369568E-01	1.766969E+00	
14	14	3.673437914579E-01	46	46	2.860000E+00	-4.000662E-02	-4.379962E-02	4.500091E+01	4.499937E+01	996	998	1.430541E+00	1.430541E+00	5.536940E-01	-1.921828E+00	
15	15	3.751585204360E-01	51	51	3.060000E+00	4.474849E-01	-2.314000E-01	4.499094E+01	4.499669E+01	1024	989	-7.229152E-01	-7.229152E-01	-4.984404E+00	2.492821E-01	
16	16	3.903003162136E-01	43	43	2.740000E+00	2.399546E-01	2.272533E-02	4.499522E+01	4.500032E+01	1013	1002	2.888051E+00	2.888051E+00	-9.712585E-01	1.748330E+00	
17	17	3.981789898264E-01	49	49	2.980000E+00	-9.496840E-02	-3.636620E-03	4.500191E+01	4.499995E+01	996	1000	-2.870219E+00	-2.870219E+00	1.032980E+00	1.712586E+00	
18	18	4.235700601437E-01	54	54	3.180000E+00	-2.639813E-01	-4.542962E-01	4.500535E+01	4.499349E+01	987	977	7.810600E-01	7.810600E-01	1.999925E+00	1.735258E-02	
19	19	4.386399990437E-01	53	53	3.140000E+00	-3.882003E-01	-7.338764E-03	4.500786E+01	4.499989E+01	980	1000	-3.565431E-02	-3.565431E-02	-1.424964E-01	1.994917E+00	
20	20	4.663181067602E-01	62	62	3.500000E+00	-8.628689E-02	-1.060739E-01	4.500175E+01	4.499848E+01	996	996	1.030079E-01	1.030079E-01	4.091231E-01	1.957707E+00	

図 4.3 fv で確認した 3 keV の光子の情報

表 1 シミュレーション出力の主なカラムとその意味

TRG-ID	観測できた光子の順番
TIME	観測時間
PHA,PI	チャンネル, エネルギーに比例したチャンネル
ENERGY	エネルギー
DETX,Y	検出器の座標
RA,DEC	天体の赤経, 赤緯
X,Y	天体の座標
DETPHI,PHI	検出器, 天体の座標上における電子の放出方向
PHE-U,Q	偏光情報

4.1.2 エネルギー分解能

図 4.3 で示された出力 (FITS ファイル) の内容をテキストファイルにダンプし、さらに TRG-ID と ENERGY を切り取った図 4.4 のようなデータファイルを作成する。このファイルを ROOT で読み込むことでヒストグラムを作成し、またフィッティングを行う。図 4.5 ~ 図 4.8 はフィッティング結果の例である。フィットは正規分布 (ガウシアン) をモデル関数とし、その具体的な表式は $p_0 \times \exp(-0.5(\frac{x-p_1}{p_2})^2)$ である。この 3 つのパラメータのうち p_1 が中央値で p_2 が標準偏差 σ を表しているため、この値を $\Delta E = \frac{2.35\sigma}{E} \times 100$ へ代入してエネルギー分解能を半値幅で % 表示で求めた。 E は入射 X 線のエネルギーである。

```

1 3.220000E+00
2 3.020000E+00
3 3.420000E+00
4 2.500000E+00
5 2.860000E+00
6 2.980000E+00
7 2.940000E+00
8 2.620000E+00
9 2.980000E+00
10 2.820000E+00
11 3.340000E+00
12 2.740000E+00
13 2.820000E+00
14 2.860000E+00
15 3.060000E+00
16 2.740000E+00
17 2.980000E+00
18 3.180000E+00
19 3.140000E+00
20 3.500000E+00
21 3.100000E+00
22 3.060000E+00
23 2.980000E+00
24 3.420000E+00
26 3.020000E+00
27 3.020000E+00
28 3.060000E+00
29 3.260000E+00
30 2.980000E+00
31 3.060000E+00
32 2.820000E+00
33 3.260000E+00
34 3.020000E+00
35 2.540000E+00
36 3.100000E+00
37 2.940000E+00
39 2.580000E+00
40 3.260000E+00
41 2.860000E+00
42 3.220000E+00
43 2.620000E+00
44 3.540000E+00
45 2.940000E+00
46 3.100000E+00
48 2.820000E+00
49 2.420000E+00
50 2.660000E+00
51 2.380000E+00
53 2.940000E+00
54 3.500000E+00

```

図 4.4 3 keV のシミュレーション出力より作成した、エネルギー分解能を調べるためのデータファイル。左のカラムがイベント番号で右のカラムがエネルギー (keV) である

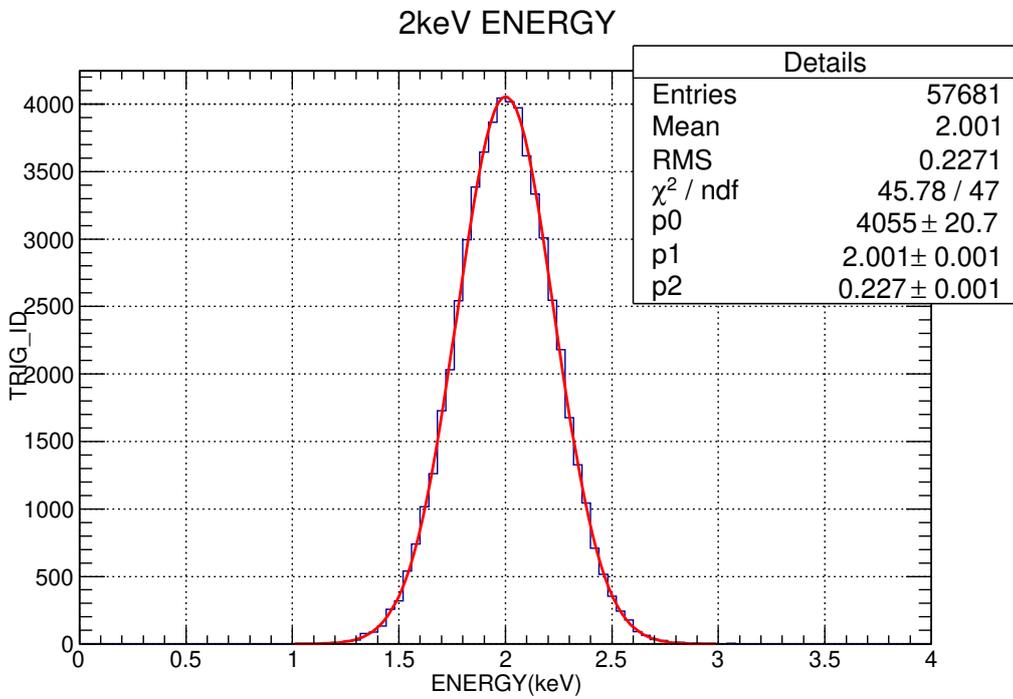


図 4.5 2 keV のフィッティング。フィットパラメータも示す

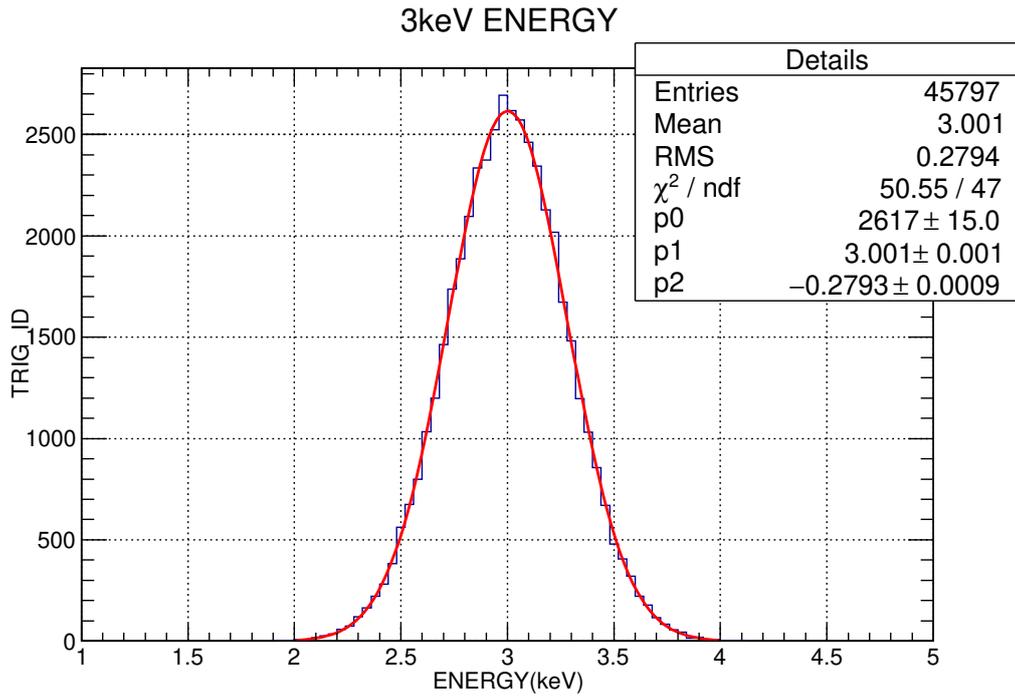


図 4.6 3 keV のフィッティング。フィットパラメータも示す

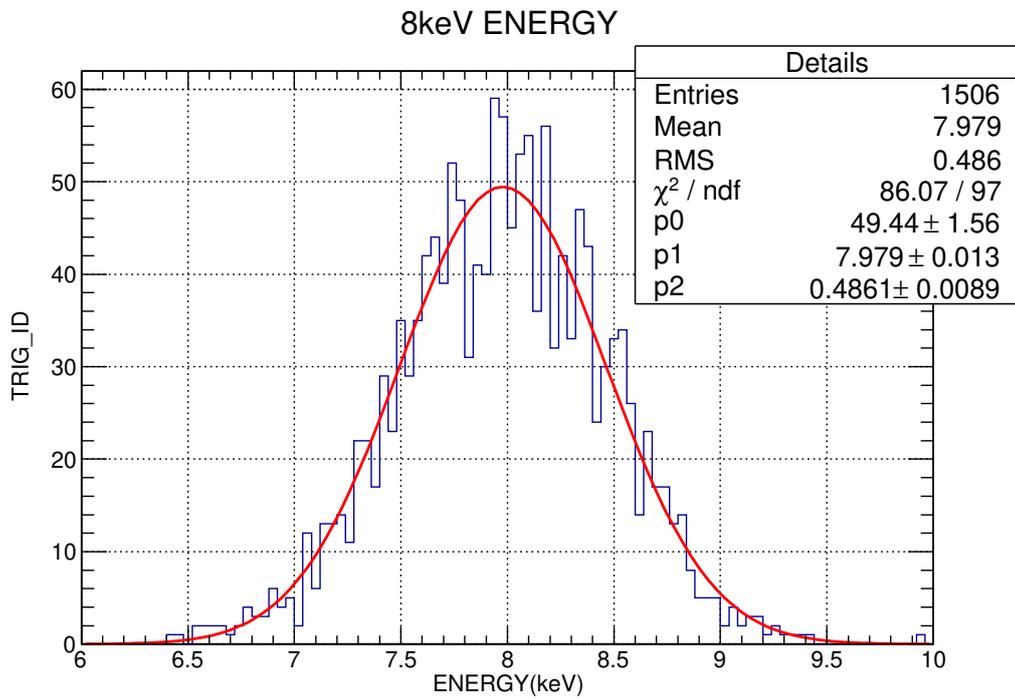


図 4.7 8 keV のフィッティング。フィットパラメータも示す

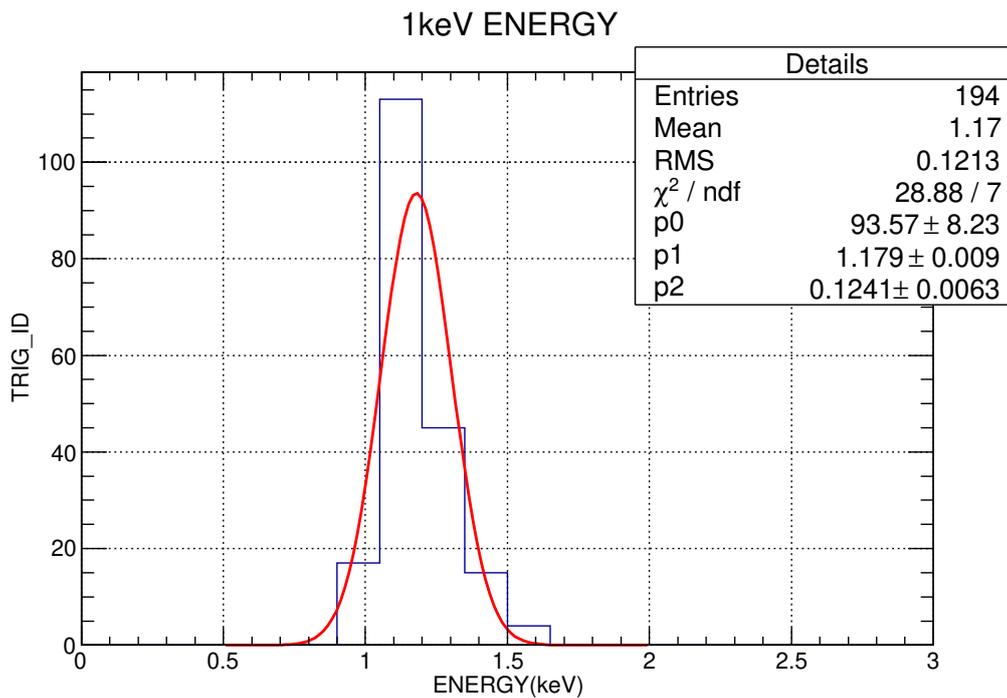


図 4.8 1 keV のフィッティング。フィットパラメータも示す

エネルギー分解能は検出器の感度が 2~8 keV であることと、図 4.8 の 1 例のように 2 keV 未満は正規分布関数でフィットできなかったことから、1、1.5、9、10 keV の 3 つを除いてプロットしたところ、図 4.9 のように指数関数的に減少しているグラフができた。

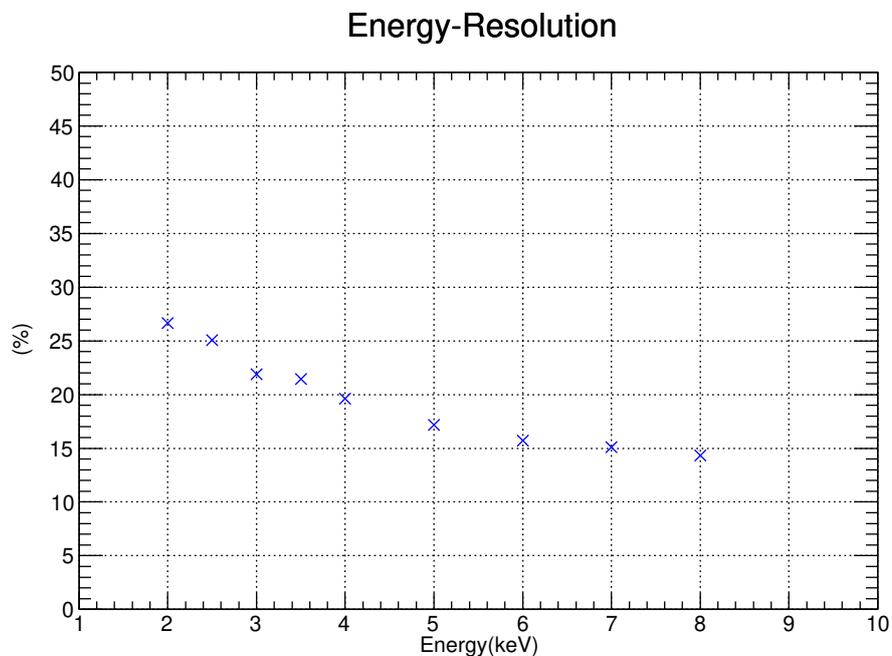


図 4.9 エネルギー分解能

両対数グラフでプロットすると図 4.10 のように直線を引くことができ、傾きは-0.5125 であった。すなわち、シミュレーターのエネルギー分解能は光電子数のポアソンゆらぎで決まっているとわかった。

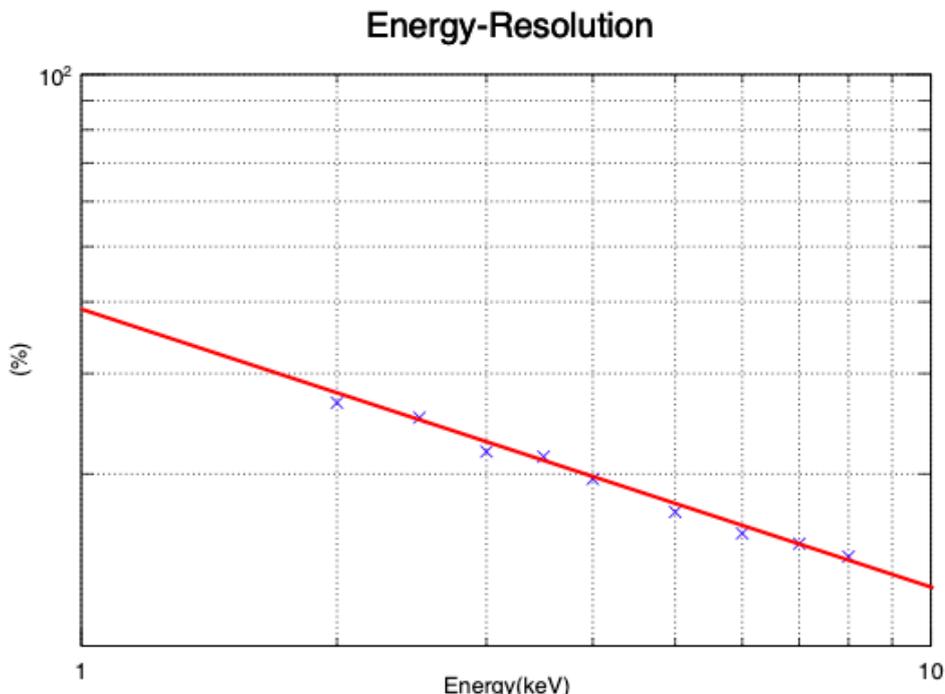


図 4.10 両対数グラフでのエネルギー分解能

また文献 [22] では 2keV でのエネルギー分解能は 27 %で、シミュレーション結果をフィットして得られた値は 26.8 %であったことから、文献値通りに応答がシミュレーターに組み込まれ、それを正しく動作させられたことが確認できた。

4.1.3 有効面積・透過確率・反応確率

有効面積は、シミュレートした X 線のフラックスから計算する。まず、図 4.2 の ascii ファイルから分かるように、2.9 ~ 3.1keV の幅 0.2keV の間でエネルギーあたりのフラックスの最大値 (三角形の頂点) が 20 になっている。そのことから三角形の面積を計算すると $0.2 \times 20 \times \frac{1}{2} = 2[\text{counts/sec/cm}^2]$ となる。従って、

$$A[\text{cm}^2] = \frac{\text{counts}}{2 \times 1000[\text{sec}]} \quad (4.1)$$

で有効面積を求めることができる。こうして得られた有効面積をプロットしたのが図 4.11 であり、1.5 keV から 8 keV の有効面積を両対数グラフで示してある。文献 [15] によると、IXPE の X 線望遠鏡自体の有効面積は 3 ~ 6 keV で 250cm² 程度であり、得られた結果は 10 倍以上小さい。また有効面積は 2.5 keV が頂点になるような形になっている。これは 2.5 keV 付近を境に左側では低エネルギーになるほど Be 窓の吸収の割合が増加し、右側では高エネルギーになるほど He と DME の混合ガスを透過する割合が増加しているためであると考えられる。

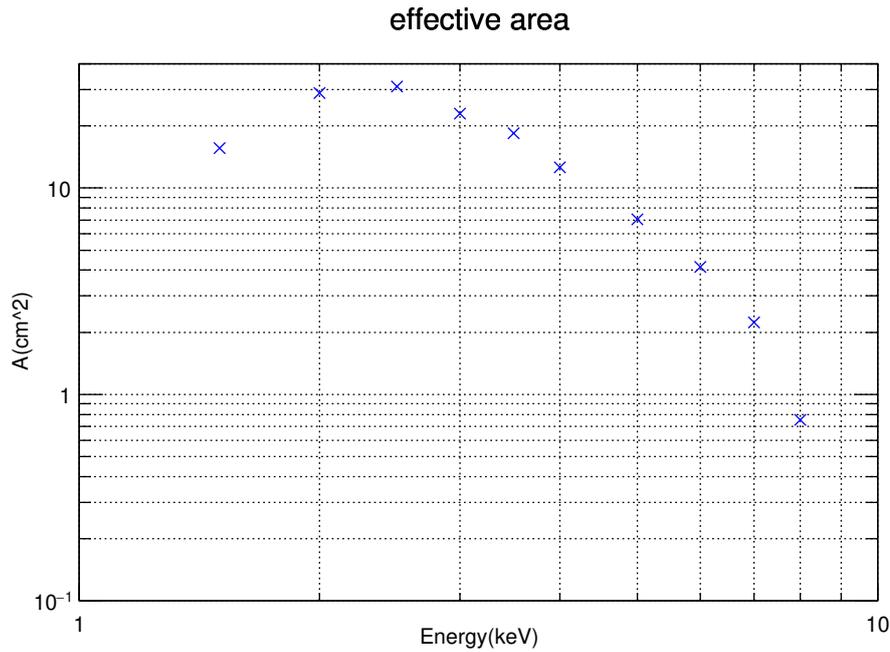


図 4.11 有効面積-両対数グラフ

そこで Be 窓の透過確率、ガス検出器の透過率を計算し、図 4.11 と比較することにした。透過確率 P_t は、アボガドロ数 $N_A = 6.02 \times 10^{23}$ 、原子量 $W=9.02$ 、密度 $\rho = 1.85[\text{g}/\text{cm}^3]$ 、反応断面積 $\sigma(2\text{keV} \text{ で } 1.11 \times 10^{-21}[\text{cm}^2][23])$ 、Be 窓の幅 $d = 5.00 \times 10^{-3}[\text{cm}]$ から、

$$P_t = \exp\left(-\frac{N_A}{W}\rho\sigma d\right) \quad (4.2)$$

より計算できる。エネルギーごとの反応断面積 σ を NIST より取得し、その値を式 4.2 に代入して計算すると、図 4.12 のような、エネルギーが高くなるに従って透過確率が 1 に近づき、また低エネルギー側では 2 keV 程度で急激に窓の吸収が効いてくるようなグラフが得られる。

最後に He-DME 混合ガスの吸収確率を求めた。吸収確率 P_a は、0() では、ジメチルエーテルの原子量 $W_{\text{DME}} = 46.07$ 、反応断面積 $\sigma_{\text{DME}}[\text{cm}^2][23]$ 、密度 $\rho_{\text{DME}} = 2.11[\text{g}/\text{cm}^3]$ 、ヘリウムの原子量 $W_{\text{He}} = 4$ 、反応断面積 $\sigma_{\text{He}}[\text{cm}^2][23]$ 、密度 $\rho_{\text{He}} = 0.125[\text{g}/\text{cm}^3]$ 、検出器の幅 $d=1\text{cm}$ を用いて、

$$P_a = 1 - \exp\left(-\frac{N_A}{W_{\text{DME}}}\sigma_{\text{DME}}\rho_{\text{DME}}(0.8d) - \frac{N_A}{W_{\text{He}}}\sigma_{\text{He}}\rho_{\text{He}}(0.2d)\right) \quad (4.3)$$

で表せる。透過確率の時と同じようにエネルギーごとの反応断面積の値を代入して計算すると、図 4.13 のような 2 keV 程度から下がり始め、エネルギーが高くなるに従って急に吸収確率が小さくなっていくようなグラフが得られた。

transmission probability

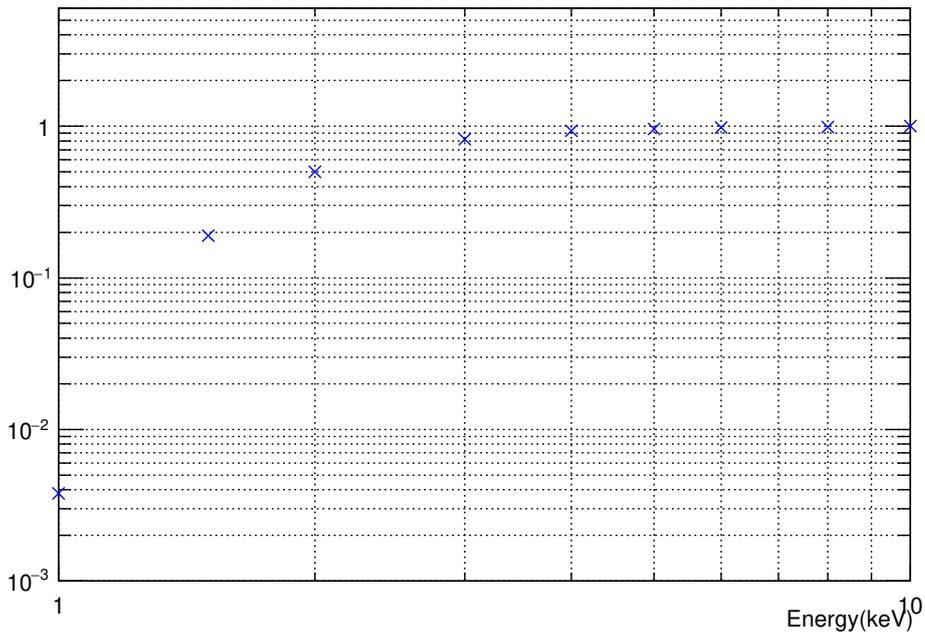


図 4.12 Be 窓の透過確率-両対数グラフ

absorption probability

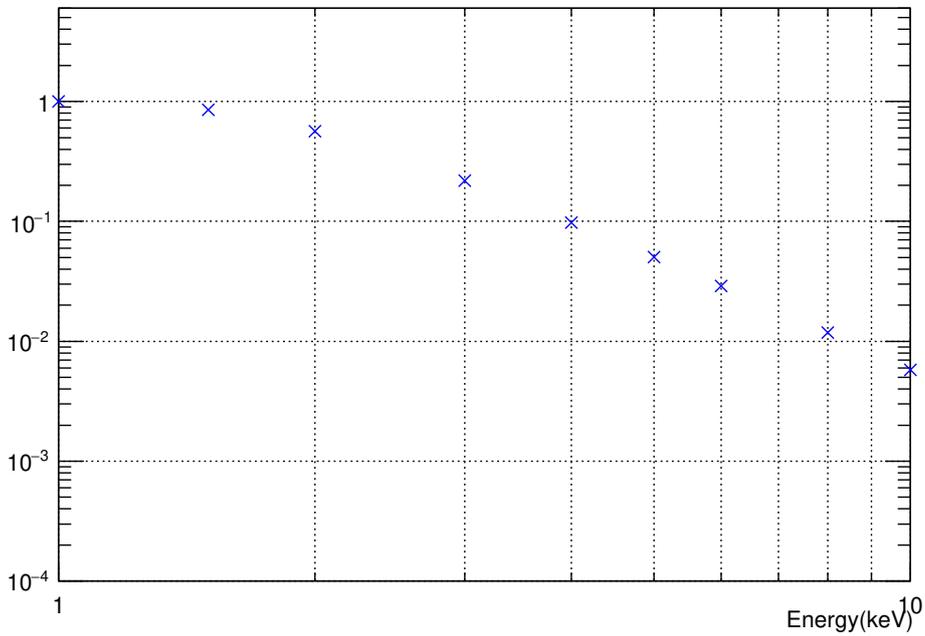


図 4.13 He(20 %) と DME(80 %) の混合ガスにおける吸収確率-両対数グラフ

図 4.14 は IXPEOBSSIM をインストールした時に作成されるマニュアルにある Be 窓の透過確率と He-DME 混合ガスの吸収確率を示した図である。青い線のグラフが混合ガスの吸収確率で、橙の線のグラフが窓

の透過確率である。2keV でどちらの確率も 0.47～0.49 であり、図 4.12 と図 4.13 を、図 4.14 と比較してみても近い値になっていることが分かる。従って検出器システム全体の有効面積が図 4.11 のような値を示す理由が定量的に理解できた。

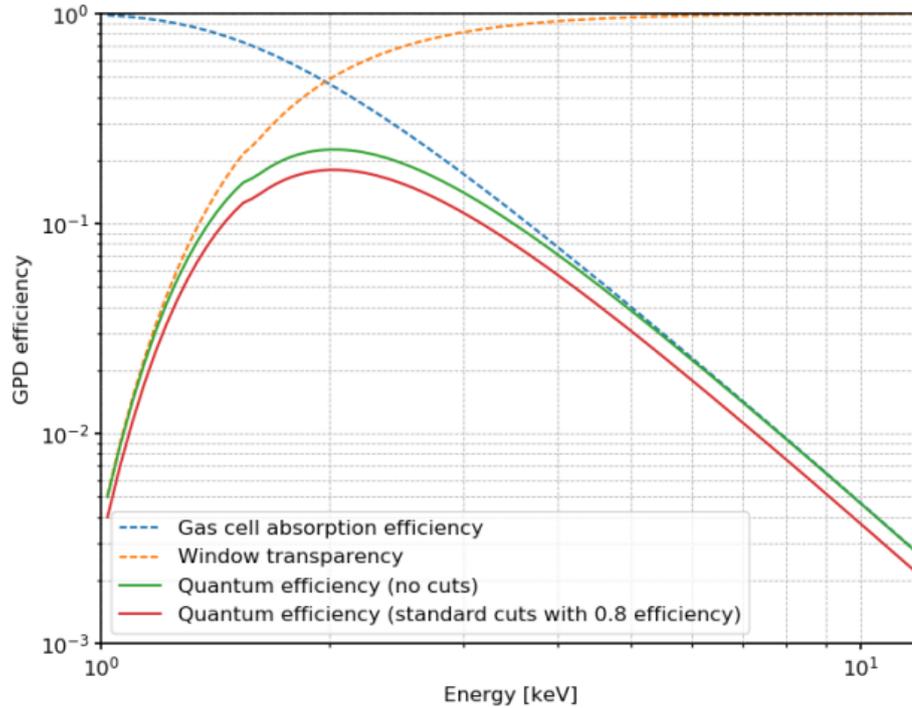


図 4.14 Be 窓の透過確率 (橙) とガスの吸収確率 (青)[24]

また、望遠鏡が 3 台あるが、今回のシミュレーションデータの解析では 1 つの望遠鏡を対象としていること、上で述べた窓の透過確率とガスの吸収確率、さらにイベントの選別効率が 80 % [25] と仮定されていることを考慮すると、3 keV における鏡自体の有効面積は

$$A_{\text{eff}} = \frac{21}{P_t \times P_a \times 0.8} = \frac{21}{0.81 \times 0.21 \times 0.8} \cong 154 \quad (\text{cm}^2) \quad (4.4)$$

となる。文献値 (250cm²) よりも値が小さくなっているが、これは、ガスの吸収確率が文献 [24] に比べて小さくなっていることが原因であると考えられる。

4.1.4 空間分解能

続いて角度応答を検証するために、天体の座標を (赤経, 赤緯)=(0,0)、望遠鏡を向ける向き (赤経, 赤緯)=(0,0) で設定し、さらに天体の赤経を-0.09 度 (-5.4 分角) から +0.09 度 (+5.4 分角) まで 0.03 度 (1.8 分角) 刻みで変えて 1000 秒で観測シミュレーションを行った。赤緯も同様に-0.09 度 (-5.4 分角) から +0.09 度 (+5.4 分角) まで変えた。図 4.15 は赤経を +0.09° にした時の 2 keV の単色点源の像である。像の形が赤経方向へ引き伸ばされているのが分かる。これは X 線望遠鏡の応答のためである。

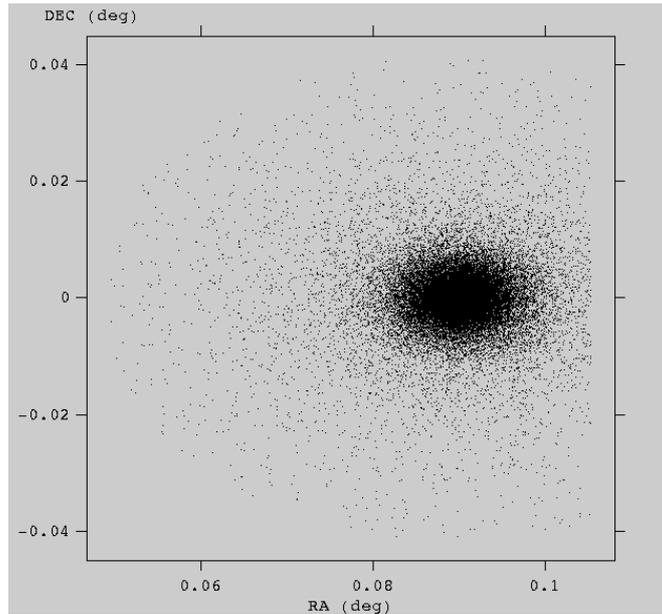


図 4.15 赤経方向へ +0.09° にした、2keV の点源の像

このシミュレーションデータを用いて、縦軸をカウント数、横軸を赤経としたヒストグラムを 4.1.2 と同様にフィットした結果を図 4.16 に示す。正規分布関数では全くフィットできないことが分かる。また、図 4.17 は裾の部分とピークの部分を組み合わせた 2 つの正規分布関数でフィットした結果である。x 軸を対数表示にしてある。この図より、2 つのガウシアンを用いてもフィットしきれないことが分かる。

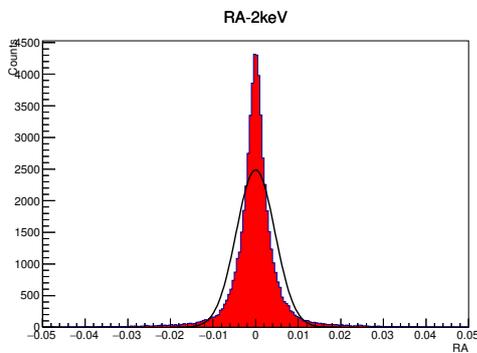


図 4.16 2 keV の正規分布関数。ピークの高さが足りていないことが分かる

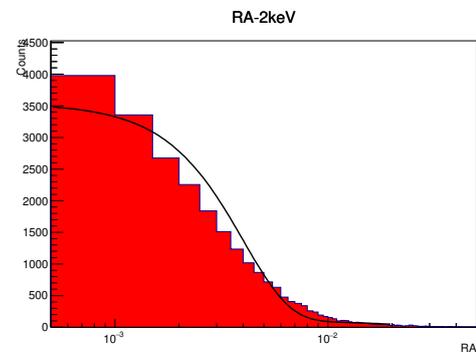


図 4.17 裾とピークを組み合わせた正規分布関数。片対数表示にしてある

このようにイメージの広がり方が正規分布でない時に、位置分解能を評価する量としてよく用いられるのが Half Power Diameter (HPD) である。これは天球座標空間でのソースの位置を中心に円を描き、全イベントの半分を含むような円の直径のことである。今は $(RA, DEC) = (0, 0)$ を中心にシミュレーションしており、RA の座標の 1° は実際の角度 1° とほぼ等しいので半径 $R = \sqrt{(RA)^2 + (DEC)^2}$ と計算できる。図 4.18 は 2 keV の場合での横軸が半径 R、縦軸がカウント数のヒストグラムである。これをさらに積分表示にしたものが図 4.19 で、1 ピンの幅は 10 秒角で、縦軸はカウント数、横軸は arcsec(秒角) である。カウント数の最大値が 57681 であり、HPD はその値が半分となる時を考えるため、図 4.19 から $13 \text{ 秒角} \times 2 \cong 26 \text{ 秒角}$ と求まる。

文献値では $HPD \leq 25$ 秒角であり [26]、概ね近い値が装置の応答として入っていることがわかった。

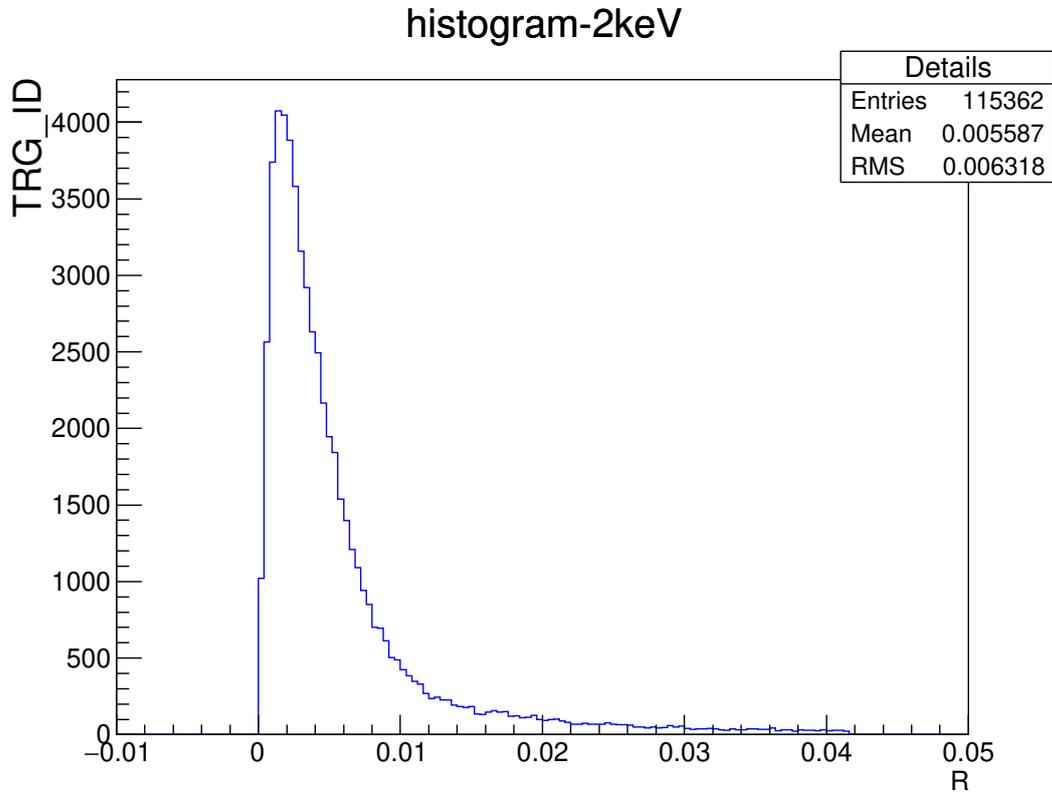


図 4.18 視野中心での 2 keV の入射角に対する角度応答。横軸は半径 $R(= \sqrt{(RA)^2 + (DEC)^2})$ で縦軸はイベント数

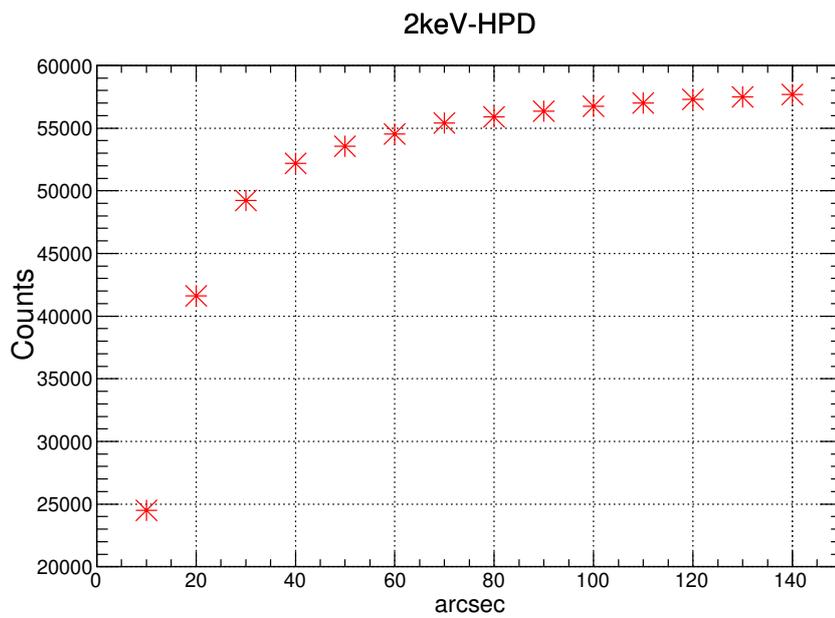


図 4.19 Half Power Diameter を得るため、図 4.18 を積分表示にしたもの

4.2 点状 X 線源の偏光解析

これまでで、シミュレーターの走らせ方、および実装されている装置の応答が概ね理解できた。次に実際に空間的に広がった天体のシミュレーションを行う準備として、今まで取り扱ってきた点状 X 線の偏光シミュレーションをし、解析をする。これを通して偏光解析手法を学ぶことを目的としている。

4.2.1 解析の手法

コンフィグレーションファイル (図 4.1) において pol-deg と pol-ang が偏光情報で、それぞれ偏光度 (0 ~ 100 %) と偏光方位角 (0 ~ 360 度) を表している。偏光に対する応答を示すモジュレーションカーブがこれらのパラメータにどう依存するかを見るために、次の 1 ~ 3 の 3 種類のシミュレーションによって pol-deg と pol-ang の各々を変更させた。ヒストグラムをフィットした式は $p_0[1 + p_1 \cos 2(\theta - p_2)]$ である。 p_0 はイベント数に比例する係数のことで、 p_1 は (偏光度) $\times \mu_{100}$ を表し、 p_2 は位相を表す。

1. エネルギーへの依存

偏光度 (pol-deg) 100 %、偏光方位角 (pol-ang) 0 度として、2 ~ 8 keV で 1000 秒間観測シミュレーションをした。その後、シミュレーション出力 (図 4.3) 中の DETPHI (検出器中における電子の放出方向の推定値) でヒストグラムを作りフィッティングを行った。そこから各エネルギーでのモジュレーションファクターを求めた。

2. 偏光方位角 (Polarization Angle) への依存

2、8 keV で pol-ang を 0, 45, 90, 135, 180 度と変更させ、100 % 偏光ビームのシミュレーションを行い、ヒストグラムへフィッティングを行った。その後どのように偏光方位角に依存するかを確認した。

3. 偏光度 (Polarization Degree) への依存

エネルギーは 2, 8 keV、偏光度は 0, 2, 20, 50, 100 % のシミュレーションを行い、ヒストグラムへフィッティングを行った。さらに、低偏光度での挙動を確認するために 2 % に加えて 1, 3, 4, 5, 10 % でのシミュレーション、また、偏光度 0 % で角度を 0, 30, 45, 60, 90 度と変えたシミュレーションも行った。

4.2.2 結果

モジュレーションファクター μ_{100} のエネルギーへの依存性は図 4.20 のように得られた。エネルギーが大きくなるに連れ μ_{100} も大きくなり、これは光電子のエネルギーが大きくなり、その射出方向が決まりやすくなるためと理解できる。また図 4.21 は文献 [27] から引用した各エネルギーでのモジュレーションファクターである。同じエネルギーでほぼ同じモジュレーションファクターの値が得られており、エネルギー依存性を定性的・定量的に理解できた。

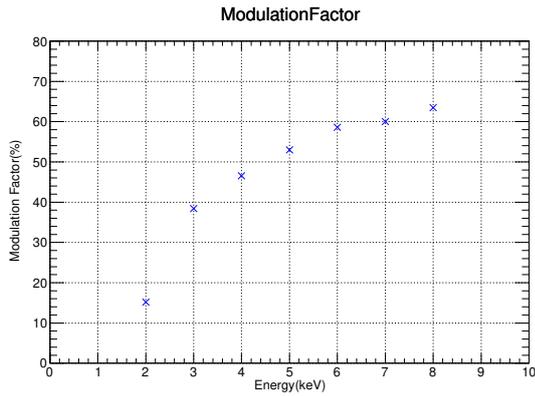


図 4.20 シミュレーションで得られたモジュレーションファクター μ_{100}

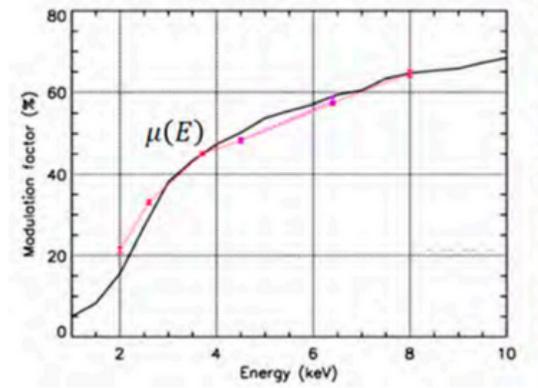


図 4.21 IXPE で期待されるモジュレーションファクター μ_{100} [27]

偏光方位角への依存性は、図 4.22 と図 4.23 に示す。これから分かるように、位相のズレから偏光方位角を推測することができる。

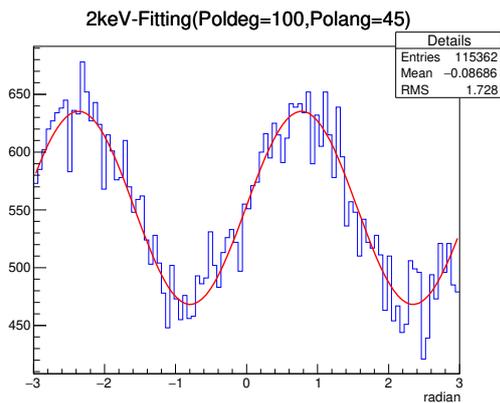


図 4.22 2 keV の偏光度 100 %、偏光方位角 45° のヒストグラムへのフィッティング結果

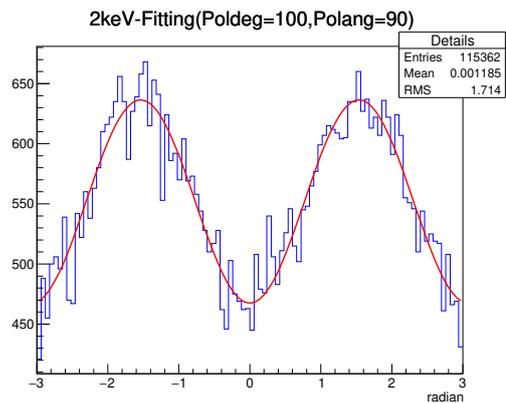


図 4.23 2 keV の偏光度 100 %、偏光方位角 90° のヒストグラムへのフィッティング結果

また図 4.24 は、緑:0° 黒:45° 青:90° 赤:135° 黄:180° のヒストグラムへのフィッティング結果である。見やすいようにヒストグラムを除いている。

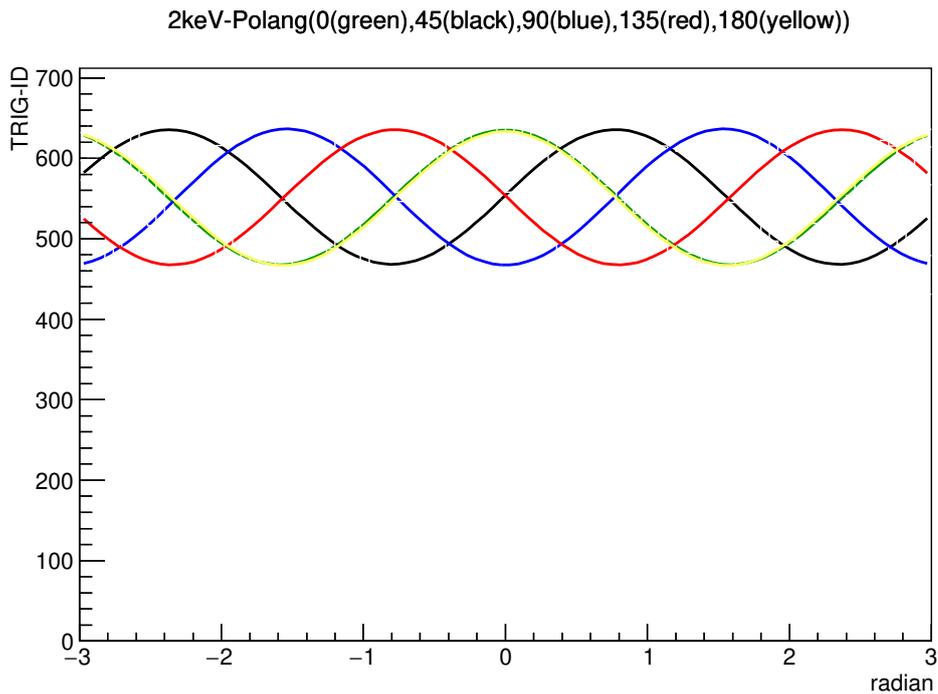


図 4.24 2keV で偏光方位角を変えた時のヒストグラムへのフィッティング結果。見やすいようにヒストグラムを除いている

以上の図 4.22 ~ 図 4.24 から、モジュレーションカーブは偏光方位角が、0 度と 180 度は一致し、90 度は反転している。また 45 度と 135 度はモジュレーションカーブの位相も $\frac{\pi}{4}$ 、 $\frac{3}{4}\pi$ づつずれていることが分かる。

最後に偏光度への依存性であるが、図 4.25 ~ 図 4.28 はそれぞれ 2,8 keV の偏光方位角 0 度、偏光度 20 % と 2 % の点状 X 線源のヒストグラムへのフィッティング結果である。偏光度が小さいと、統計誤差を小さくするためにイベント数を多くする必要があり、どちらも 100000 秒で観測シミュレーションを行った。表 2 は式 2.33 および式 2.34 で求められたモジュレーションファクターおよび偏光度である。誤差の範囲で入射 X 線の偏光度が再現できているところもあるが、低偏光度では 1 ~ 1.5 % 程設定した偏光度から離れてしまう。また図 4.29 と図 4.30 は $y=x$ で出力されるはずの偏光度から、計算値がどれだけ離れてしまうかを表したグラフである。やはり低偏光度のほうがズレが大きいことが分かる。

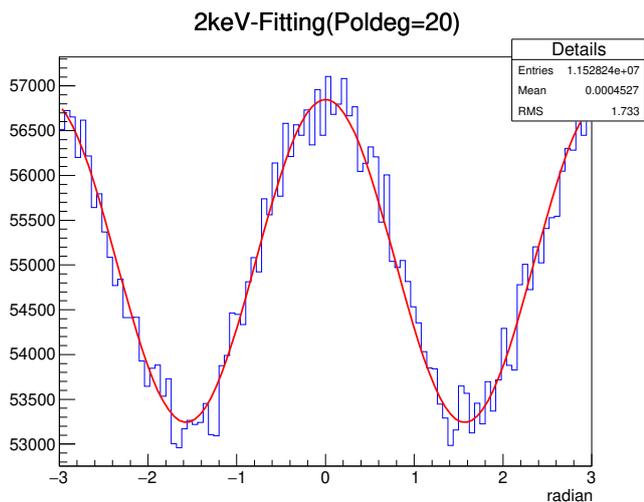


図 4.25 偏光度 20 % の 2 keV の点源で 100000 秒シミュレーション結果

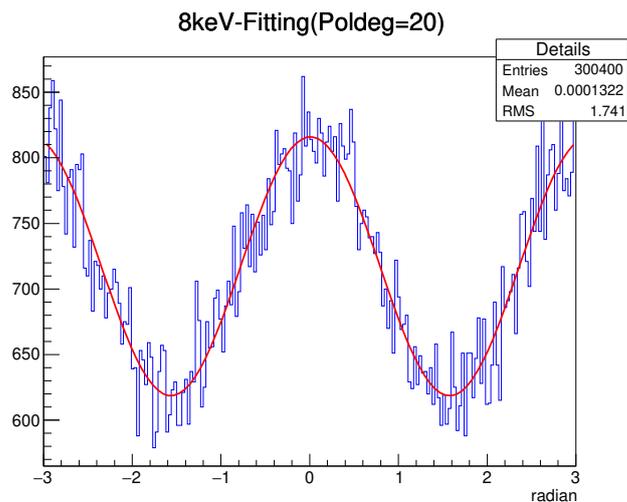


図 4.26 偏光度 20 % の 8 keV の点源で 100000 秒シミュレーション結果

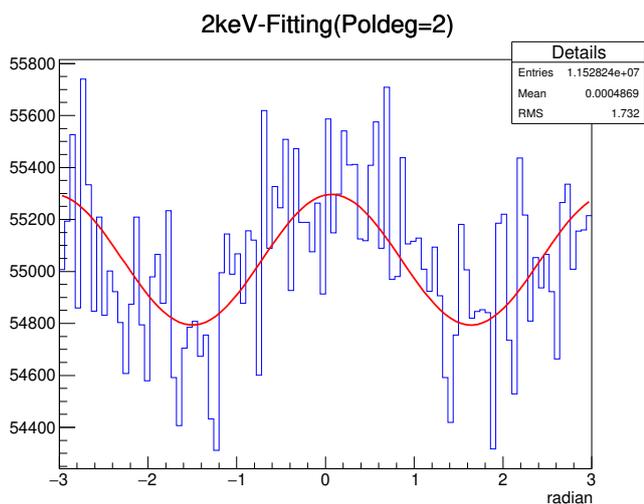


図 4.27 偏光度 2 % の 2 keV の点源で 100000 秒シミュレーション結果

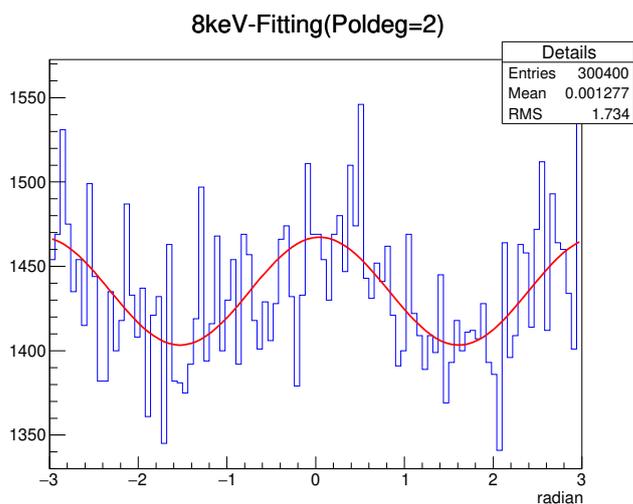


図 4.28 偏光度 2 % の 8 keV の点源で 100000 秒シミュレーション結果

表 2 2,8 keV で 100000 秒シミュレーションした際の偏光度

エネルギー (keV)	設定した偏光度	モジュレーションファクター μ ($\times 10^{-2}$)	計算から求められた偏光度 (%)
2	1	0.31 \pm 0.06	1.92 \pm 0.39
2	2	0.47 \pm 0.06	2.97 \pm 0.39
2	3	0.61 \pm 0.06	3.86 \pm 0.39
2	4	0.77 \pm 0.06	4.87 \pm 0.39
2	5	0.92 \pm 0.06	5.82 \pm 0.39
2	10	1.71 \pm 0.06	10.82 \pm 0.39
2	20	3.28 \pm 0.06	20.75 \pm 0.39
2	50	7.98 \pm 0.06	50.47 \pm 0.39
8	1	1.60 \pm 0.38	2.45 \pm 0.58
8	2	2.23 \pm 0.38	3.42 \pm 0.58
8	3	2.87 \pm 0.38	4.40 \pm 0.58
8	4	3.52 \pm 0.38	5.40 \pm 0.58
8	5	4.16 \pm 0.38	6.38 \pm 0.58
8	10	7.36 \pm 0.38	11.29 \pm 0.58
8	20	13.74 \pm 0.38	21.08 \pm 0.58
8	50	33.02 \pm 0.36	50.66 \pm 0.55

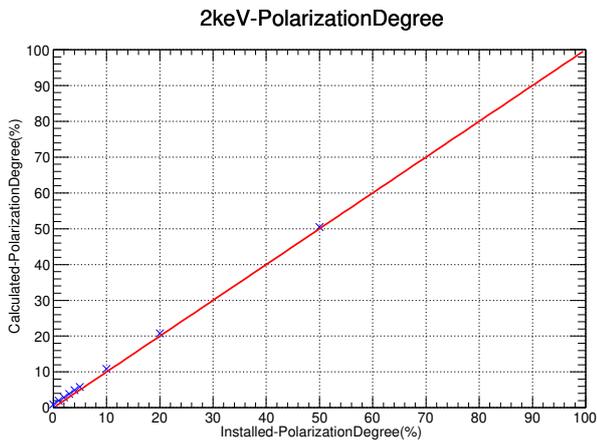


図 4.29 2 keV の設定した偏光度と計算した偏光度の関係 ($y=x$ からどれだけ離れているかの確認)

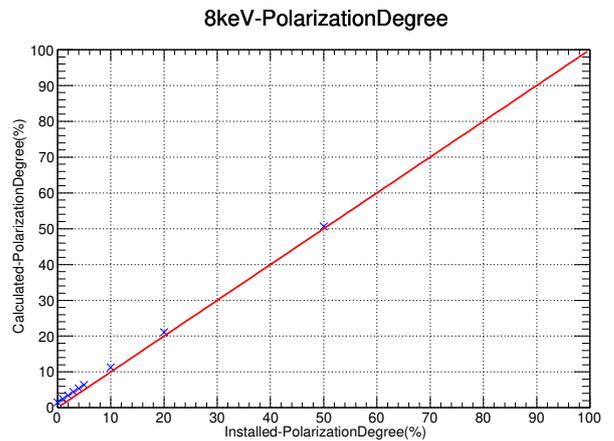


図 4.30 8 keV の設定した偏光度と計算した偏光度の関係 ($y=x$ からどれだけ離れているかの確認)

偏光度が 0 %での挙動を確認するために偏光度 0 %で角度を 0,30,45,60,90 度と変え、ヒストグラムヘフィッティングを行った。図 4.31,4.32 は偏光方位角が 30 度の時のモジュレーションである。

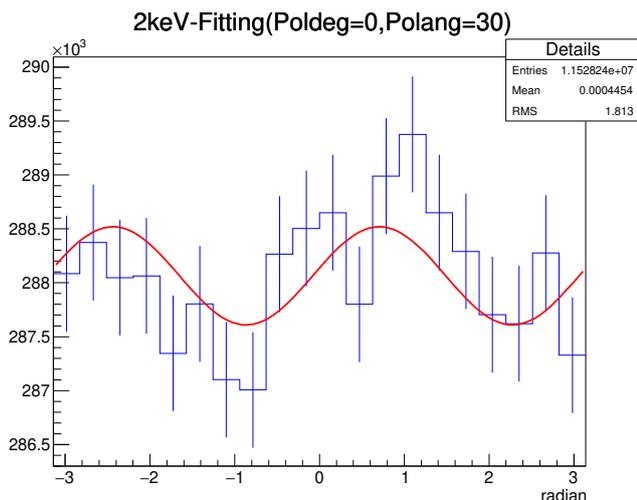


図 4.31 2 keV で偏光度 0 %、方位角 30 度に設定したモジュレーション。ピン幅 20

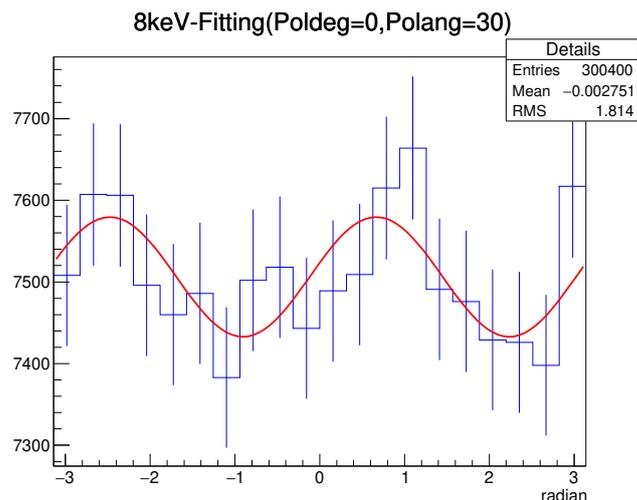


図 4.32 8 keV で偏光度 0 %、方位角 30 度に設定したモジュレーション。ピン幅 20

表 3,4 は方位角を変えていった時の、計算で求められた偏光度と、その時の位相 (p_2) である。

表 3 2 keV で偏光度 0 %, 方位角を 0,30,45,60,90 と変えた時

pol-ang	計算による偏光度 (%)	方位角 (degree)
0	0.84±0.37	10.89±12.61
30	1.00±0.37	41.83±11.46
45	1.04±0.37	56.72±10.89
60	0.86±0.37	70.47±11.46
90	0.84±0.37	106.57±12.03

表 4 8 keV で偏光度 0 %, 方位角を 0,30,45,60,90 と変えた時

pol-ang	計算による偏光度 (%)	方位角 (degree)
0	1.22±0.56	4.70±12.61
30	1.50±0.56	38.39±10.89
45	1.18±0.56	53.86±13.75
60	1.27±0.56	66.46±12.61
90	1.24±0.56	94.54±12.61

表 3、4 から分かるように 2,8 keV とともにある一定値分だけ 0 % よりも大きくなっていることが分かる。ここでシミュレーション結果が、期待される装置の応答となっているかどうかを定量的に考える。

2 keV の MDP は全イベント数を N_{tot} として、 $\frac{429}{\mu_{100}\sqrt{N_{tot}}} \approx \frac{429}{0.158\sqrt{1.153 \times 10^7}} \approx 0.80(\%)$ となる。これは 0 % 偏光を入射した時、 $0.80/3.03 = 0.26\%$ の統計誤差 σ をもって Q, U 平面に $(0,0)$ を中心として分布することを意味する [28]。つまり、 Q, U 平面上における、分布確率 $f(Q, U)$ は $f(Q, U)dQdU \propto \exp(-\frac{1}{2\sigma^2}(Q^2 + U^2))dQdU$ (ただし $\sigma = 0.0026$) ということである。この時、得られる偏光度の最頻値は、 Q, U 平面上の円の半径 r (偏光度のこと) と角度 θ に $(Q, U) \rightarrow (r = \sqrt{Q^2 + U^2}, \theta = \arctan \frac{U}{Q})$ という単位変換をし、半径 $r \sim r + dr$ に分布する確率が最大になるという条件から求められる。すると、 $F(r) = 2\pi r \exp(-\frac{r^2}{2\sigma^2})$ が最大になることから、 $F'(r) = 2\pi(1 - \frac{r^2}{\sigma^2} \exp(-\frac{r^2}{2\sigma^2})) = 0$ 、すなわち、 $r = \sigma$ となる。また θ (偏光方位角の 2 倍) はシミュレーション毎にバラバラになると予想される。従って偏光度は 0.26 % 程度、方位角はランダムになると予想される。一方、表 3、4 より、得られた偏光度は MDP 程度であり、また得られた偏光方位角は

入射偏光方位角に近い。すなわち予想される装置の応答と異なっている。このことは今後引き続き精査する。

5 まとめと今後の展望

5.1 応答確認のまとめ

シミュレーターのインストール後に行った応答確認の前半部分である、エネルギー分解能、有効面積、またそれに関しての Be 窓の透過確率・ガス検出器中の吸収確率の計算、角度分解能 (HPD) の値は文献値と比較してみても、ふさわしい値が装置に組み込まれていることが確認できた。

後半部分である点状 X 線源の偏光解析では、IXPE 衛星の有効感度である 2~8keV のモジュレーションファクターを計算し、こちらも文献値と比較して近い値が装置に組み込まれていることが確認できた。またその結果から解析に用いたフィッティングの式に間違いがないことも確認できた。一方、シミュレーション条件で指定した偏光度とモジュレーションカーブの解析で得られた偏光度に僅かではあるが系統的なズレが見られ、装置の応答からの予想とも異なっており、引き続き調査を行う。

5.2 ストークスパラメータを用いた解析

これまでは光電子の射出方向の頻度分布 (モジュレーションカーブ) を、 $p_0[1 + p_1 \cos 2(\theta + p_2)]$ という、偏光度、偏光方位角をパラメータとした関数でフィットしているが、この方法が有効なのは統計が十分な場合である。他にフィッティングの式として、2 章で述べたストークスパラメータを用いた方法が提案されており、偏光度が小さい場合に適用してみたい。

5.3 実天体を想定したシミュレーション

装置の応答確認と点状 X 線源の偏光解析が成功したら、次のステップは広がった実天体を想定したシミュレーションデータの解析手法の研究である。そこで、かに星雲を想定したシミュレーションを行い、正しい偏光度・偏光方位角を推測する手法の研究を行いたい。

5.3.1 かに星雲

図 5.1 はチャンドラ衛星による、X 線で見えたかに星雲である。かに星雲は 1054 年に起きた超新星爆発で作られたパルサー風星雲であり、中心に周期 33ms で回転する中性子星を持つ。視野は可視で $6' \times 4'$ 、X 線で $3' \times 3'$ である。しかし、HPD \approx 25 秒角であることから角度分解能は十分に小さくはなく、イメージがなまって (異なる領域の信号が混ざって) しまう。

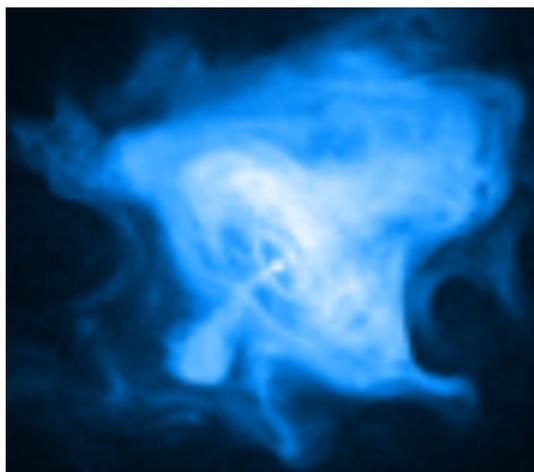


図 5.1 X 線で見たかに星雲 [29]

図 5.2 は、かに星雲を IXPEOBSSIM で観測シミュレーションをし、fv で見た結果である。図 5.1 とクレベルとぼやけてしまっているのが分かる。図 5.3 は可視光で見た場合のかに星雲の偏光マップである。実線方向が偏光方向を表す。X 線でもこのように空間分解した偏光情報を得るのが目標となっている。

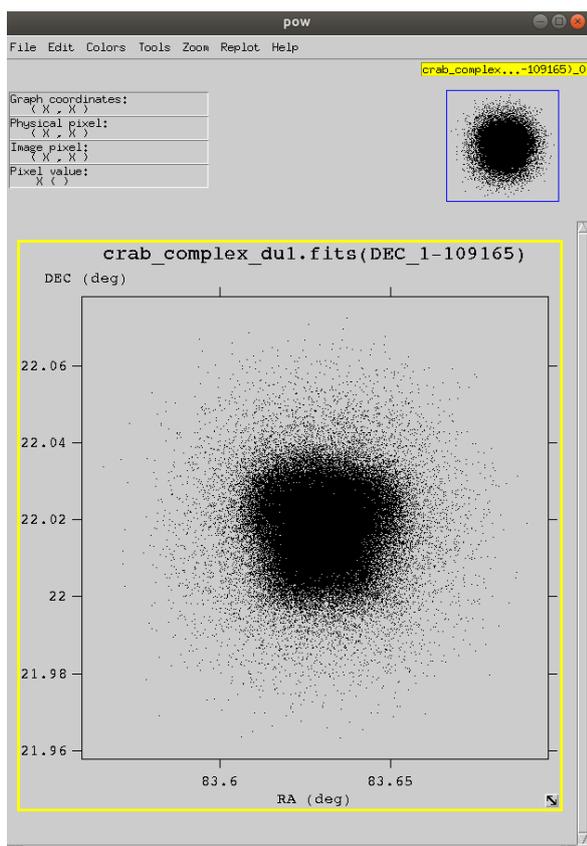


図 5.2 かに星雲を fv で見た図

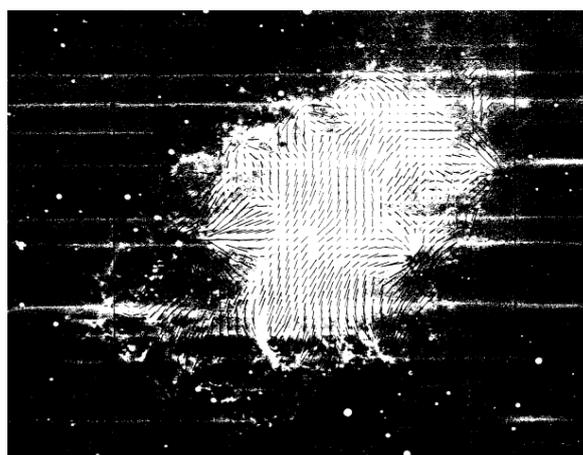


図 5.3 可視光で見た場合の偏光マップ [31]

5.3.2 その他高エネルギー天体

IXPEOBSSIM にはかに星雲の他にも超新星残骸カシオペア A を想定したシミュレーションデータもあるため、かに星雲のシミュレーション後に取り組むべき対象の一つである。また、自分でファイルを作り、内部の情報を変更するなどして装置の応答をより深く知ることも課題であると考えている。

謝辞

本論文の作成にあたって、指導教員の水野先生にはシミュレータのインストール、動作方法、解析方法、などご指導いただき大変お世話になりました。また、物理の論文の書き方についても教えていただきました。本当に有難うございます。勉強や研究に対する意欲が非常に高まり大学院進学のモチベーションの一つになりました。また M2 の小山さんや悠梨香さんには ROOT の解析について一から助言をいただき、楊さんには解析や、論文を書くための便利なツールを教えていただきました。本当に有難うございました。

ただ先生方を含め多くの方には隣の大間々 (ママ) とのだる絡みに巻き込んでしまい少しだけ申し訳なく思っていますが、今後ともよろしくお願いします。

参考文献

- [1] Geroge B.Rybicki and Alan P.Lightman,1979,Radiative Processes in Astrophysics,John Wiley Sons,Inc
- [2] Geroge B.Rybicki and Alan P.Lightman,1979,Radiative Processes in Astrophysics,John Wiley Sons,Inc.,P63
- [3] Geroge B.Rybicki and Alan P.Lightman,1979,Radiative Processes in Astrophysics,John Wiley Sons,Inc.,P170
- [4] Geroge B.Rybicki and Alan P.Lightman,1979,Radiative Processes in Astrophysics,John Wiley Sons,Inc.,P179
- [5] 放射線技師国家試験備忘録 <http://morido.wp.xdomain.jp/physics/compton/>
- [6] 石川友清,1996,放射線概論,通信産業研究社,P100
- [7] 幅田翔,2016,X線天文衛星ひとみ搭載 SGD の偏光観測に向けたデータ処理の最適化,P7
- [8] Martin C.Weisskopf,2018,An Overview of X-Ray Polarimetry of Astronomical Sources,Galaxies 2018,P7
- [9] Martin C.Weisskopf,2018,An Overview of X-ray Polarimetry of Astronomical Sources,Galaxies 2018,P11
- [10] Martin C.Weisskopf,2018,An Overview of X-ray Polarimetry of Astronomical Sources,Galaxies 2018,P2
- [11] 大阪大学 X線天文学グループ,2008,硬 X線偏光観測気球実験,P6
- [12] 大阪大学 X線天文学グループ,2008,硬 X線偏光観測気球実験,P6
- [13] Martin C.Weisskopf,2018,An Overview of X-ray Polarimetry of Astronomical Sources,Galaxies 2018,P5
- [14] Martin C.Weisskopf,2016,The Imaging X-ray Polarimetry Explorer(IXPE),Space Telescopes and Instrumentation 2016,P2
- [15] Martin C.Weisskopf,2016,The Imaging X-ray Polarimetry Explorer(IXPE),Space Telescopes and Instrumentation 2016,P5
- [16] Martin C.Weisskopf,2016,The Imaging X-ray Polarimetry Explorer(IXPE),Space Telescopes and Instrumentation 2016,P5
- [17] Martin C.Weisskopf,2016,The Imaging X-ray Polarimetry Explorer(IXPE),Space Telescopes and Instrumentation 2016,P3
- [18] Martin C.Weisskopf,2016,The Imaging X-ray Polarimetry Explorer(IXPE),Space Telescopes and Instrumentation 2016,P4
- [19] 早藤麻美,2019,X線偏光観測衛星 IXPE に向けた偏光計用ガス電子増幅フォイルの開発,理研,第19回宇宙科学シンポジウム
- [20] IXPEOBSSIM をインストールした際に同時に制作されるマニュアルより

- [21] IXPE-J 提案書
- [22] Martin C.Weisskopf,2018,An Overview of X-ray Polarimetry of Astronomical Sources,Galaxies 2018,P10
- [23] <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>,NIST
- [24] IXPEOBSSIM をインストールした際に同時に制作されるマニュアルより
- [25] IXPEOBSSIM をインストールした際に同時に制作されるマニュアルより
- [26] Martin C.Weisskopf,2018,An Overview of X-ray Polarimetry of Astronomical Sources,Galaxies 2018,P10
- [27] Martin C.Weisskopf,2018,An Overview of X-ray Polarimetry of Astronomical Sources,Galaxies 2018,P11
- [28] 枝廣育美,2015, ASTRO-H 衛星搭載 軟ガンマ線検出器コンプトンカメラを用いた偏光ビーム試験, 高エネルギー宇宙研究室 M 論文
- [29] NASA/CXO/MSFC 提供
- [30] <http://chandra.harvard.edu/photo/2009/crab/crab.jpg> より。X 線: NASA/CXC/SAO/F.Seward; 可視光: NASA/ESA/ASU/J.Hester and A.Loll; 赤外線: NASA/JPL-Caltech/Univ. Minn./R.Gehrz
- [31] Woltjer.L,Astronomical Institutes of The Netherlands,NASA Astrophysics Data System,Crab nebula taken by W.Baade