IXPE衛星によるブラックホール連星からの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

B166134

葛葉朋彦

主查:水野恒史 副查:石川健一

2020年2月

概 要

2021年4月に打ち上げられる IXPE 衛星は、未だ行うことのできなかった高エネルギー天体の軟 X 線にお ける偏光観測を可能にすると期待されている。IXPE 衛星は偏光に対し、高い感度を有するが、一般に軟 X 線は熱的放射が強く天体からの偏光が弱いため、慎重な解析が必要である。そこで、IXPEOBSSIM という 専用のシミュレーションソフトを用い、空間分解能、エネルギー分解能など装置の応答をフルに取り込んだ シミュレーションで感度評価を行う。今回私は一般相対論効果による偏光が期待される系内ブラックホール 連星にこのシミュレータを適用した。図は IXPEOBSSIM で2 keV および 8 keV の単色 X 線を打ち込んだ 時のエネルギー分解能をシミュレーションしたものである。縦軸が光子数、横軸がエネルギーであり、エネ ルギー分解能は典型的に 20 %程度であることがわかる。

ブラックホール連星から観測される X 線は、降着円盤やコロナにおける散乱 (コンプトン散乱) で偏光が 生じ、時空のゆがみにより光の進路が曲がること (一般相対論効果) により偏光の仕方が変わる。その際、ブ ラックホール近傍からエネルギーの高い X 線がでるので、偏光度・偏光方位角がエネルギー依存性を持つ。 また、ブラックホールの回転があると降着円盤がブラックホールのより近くまで到達することにより、回転 するブラックホールの方がエネルギー依存性が大きくなることが想定される。本研究では、GRS1915+105 が全く回転のない Schwarzschild Black Hole である場合と光速度回転する Kerr Black Hole の2つを仮定 し、シミュレーションを行った。解析では、X 線偏光のエネルギー依存性の違いからブラックホールの回 転の有無を判別できるのか吟味した。



目 次

第 1章	序論	4
1.1	北景	4
1.2	研究の目的	4
第2章	ブラックホール (BH) 連星の X 線偏光観測	5
2.1	BH 連星からの X 線放射	5
2.2	偏光とは....................................	7
2.3	装置のエネルギー応答....................................	8
2.4	BH 連星からの X 線偏光	9
第3章	IXPE 衛星とシミュレーションソフトウェア	13
3.1	IXPE 衛星の概要	13
3.2	X 線偏光検出器	14
3.3	IXPEOBSSIM	16
第 4章	X 線偏光シミュレーションの結果	18
4.1	シミュレーションおよび解析方法	18
4.2	エネルギー分解能の測定	22
4.3	Power law での X 線偏光観測シミュレーション	24
	4.3.1 一定の偏光度, 偏光方位角でのシミュレーションと解析	24
	4.3.2 スペクトルフィットを用いた解析	27
4.4	BH 連星からの X 線偏光観測シミュレーション	30
第5章	まとめ	36

図目次

2.1	BH と通常の星の連星 [1]	5
2.2	降着円盤とコロナ [2]	6
2.3	楕円偏光の様子	7
2.4	コンプトン散乱 [7]	9
2.5	光が時空のゆがみにより曲がる様子 [9]	11
2.6	GRS1915+105 の BH の回転ありと回転なしの偏光度と偏光方位角のグラフ [10]	11
3.1	IXPE 衛星イメージ図 [11]	13
3.2	検出器 (GDP)[12]	14
3.3	K 殻電子の放出 [13]	15
3.4	光電子の放出角度分布 [14]	15
3.5	100 % 偏光を入射させた際のモジュレーションファクター [15]	17
3.6	IXPEOBSSIM の内部構造 [?]	17
4.1	2 keV の単色 X 線をシミュレーションするときに使用するコンフィグレーションファイルを	
	例としてあげる。下から 5 行目では 2 keV の ascii ファイル 2 keV.txt が読み込まれている。	18
4.2	2 keV の単色 X 線の ascii ファイル (左の列がエネルギー、右の列がフラックスを設定している)	19
4.3	fv で確認した単色 X 線 (2 keV) の光子情報	20
4.4	2keV の単色 X 線のシミュレーション結果から切り抜かれた dat ファイル (左の列が光子番	
	号、右の列がエネルギー)	20
4.5	2 keV の単色 X 線のシミュレーション結果を元に、ROOT でグラフを表示させるために作	
	成したプログラム	21
4.6	8 keV のヒストグラムおよびフィッティング	22
4.7	8 keV のヒストグラムおよびフィッティング	23
4.8	両対数グラフでのエネルギー分解能	23
4.9	Power law のコンフィグファイル (toy_point_source)	24
4.10	冪指数1	25
4.11	冪指数2	25
4.12	Power law 偏光情報算出表	26
4.13	Power law の偏光度	26
4.14	Power law の偏光方位角	27
4.15	光子数のフィット	28
4.16	$Q o \mathcal{I} \mathcal{I} \mathcal{I} \mathcal{I}$	29

4.17	Uのフィット	29
4.18	偏光度 (真ん中の行) を 10 倍した Polarization_spin0.0_r30.txt(一部抜粋) である。左の列は	
	エネルギー、右の列は偏光方位角を示す。	30
4.19	シミュレーションで得られたスピンパラメータ 0.0 の光子数	31
4.20	シミュレーションで得られたスピンパラメータ 0.998 の光子数	31
4.21	シミュレーションで得られたスピンパラメータ 0.0 の Q............	31
4.22	シミュレーションで得られたスピンパラメータ 0.998 の Q............	31
4.23	シミュレーションで得られたスピンパラメータ 0.0 の U	31
4.24	シミュレーションで得られたスピンパラメータ 0.998 の U	31
4.25	偏光情報算出表 (スピンパラメータ 0.0)	32
4.26	偏光情報算出表 (スピンパラメータ 0.998)	32
4.27	偏光度 (スピンパラメータ 0.0)	33
4.28	偏光度 (スピンパラメータ 0.998)	33
4.29	偏光方位角 (スピンパラメータ 0.0)	34
4.30	偏光方位角 (スピンパラメータ 0.998)	34

第1章 序論

1.1 背景

宇宙には未解明な部分が多く、そのなかでもブラックホールは未だ謎の多く残る天体である。ブラック ホールは恒星と連星になっていることが多く、ブラックホールに恒星のガスが落ちていくときに高エネル ギーのX線を放射する。そのX線が地球にある望遠鏡や衛星などで検出される際、ほとんどのX線が、 散乱や一般相対論効果を受けて偏光された光である。この偏光されたX線が観測できれば、解析をするこ とができ、降着円盤における幾何学的構造の解明や一般相対論効果の実証につながる。しかし、これまで 感度の良いX線偏光検出器を製作するのが技術的にも困難であったことからこのような偏光観測を観測す ることができていなかった。そこで、より高感度のX線偏光観測を可能にするため、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年には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 せた偏光計が完成させた。その偏光計を搭載した IXPE 衛星が 2021年4月に打ち上げられる予定であり、 ブラックホールだけでなく、広がった天体や超新星残骸といった多くの天体の幾何学的構造が解明できると 期待されている。

1.2 研究の目的

IXPE 衛星が打ち上がった後、ブラックホール連星からくる光を検出し解析することができればブラッ クホールのについての解明が進むと考えられるが、X線の偏光解析は簡単に行うことができない。ブラック ホール連星からくる光の多くは軟 X線と呼ばれる熱的放射が強く天体からの偏光が弱い X線であり、慎重 な解析が必要になるためである。そこで、IXPE 衛星が打ち上げられる前に、ブラックホール連星からやっ てくる偏光のシミュレーションおよび解析を行うことで、IXPE 衛星が打ち上げられてすぐ、解析し解明が できると考えられる。本研究ではシミュレーションを行って、解析手法の研究を行う。

シミュレーションで用いられるのが IXPEOBSSIM という専用のソフトである。IXPEOBSSIM ではエネ ルギー分解能、有効面積、偏光検出器能力など装置の応答をフルに取り込んだシミュレーションで感度評価 を行うことができる。そのため、正しい偏光情報を推測することができ、IXPE 衛星での観測が正確に再現 できると考えられている。私は観測された X 線偏光がブラックホール連星からの放射だった場合を想定し、 偏光度、偏光方位角から BH の回転の有無が判別できるか、シミュレーション結果を元に解析を行った。

シミュレータのインストールから始まり、単色 X 線での偏光観測シミュレーションを用いたエネルギー 分解能の評価、Power law を用いたシミュレーションおよび解析、最後はブラックホールの回転の有無によ るシミュレーションおよび解析という手順で研究を進めた。

第2章 ブラックホール (BH) 連星のX線偏光観測

ブラックホール (BH) 連星には、「BH と通常の星 (恒星) の連星」と「BH 同士の連星」の2種類が存在 する。本研究では IXPE 衛星での観測のターゲットである前者にハイライトし、この先「BH 連星」は BH と通常の星の連星を指すものとする。図 2.1 は、BH と通常の星の連星のイメージ図である。



図 2.1: BH と通常の星の連星 [1]

2.1 BH 連星からの X 線放射

星の進化の最終形態で、通常の恒星に比べ質量あたりの大きさが小さい星をコンパクト天体と呼び、白 色矮星 (電子の縮退圧で支えられたコアのみからなる天体)、中性子星 (核子同士の反発力により自己重力を 支える天体)、そして BH の3種類がある。白色矮星や中性子星は形成された時、一般に高温だが、その後 は冷えていく一方である。また、BH は単体で存在する場合、そもそも放射を起こさない。しかし、連星系 の場合は、もう一方の天体からガスが降着し重力エネルギーが解放され、コンパクト天体の表面や降着ガ ス自身が熱放射することができる。さらにコンパクト天体は、重力エネルギーが大きいため、ガスは高温に なり高エネルギー光子を放射することができる。

BH が自身の重力で恒星のガスを吸収していく際、ガスは角運動量を持つため BH に直接落ちる (自由落下) ことはせず、BH の周りにガスのリング (降着円盤) を形成する。降着円盤には粘性があり、以下の2つの働きをするので、重力エネルギーは熱運動、そして放射へとエネルギーが転換されていく。

- 1. 角運動量輸送:角運動量を降着円盤の外側に輸送し、ガス降着を可能にする。
- 2. 摩擦熱の発生: ガスが BH の周りを回る際、摩擦熱が発生し、高温になる。そのため、重力エネルギー が効率よく熱エネルギーに転換され放射を行う。

つまり、降着円盤でのエネルギーの流れをまとめると、

となる。

降着する粒子の質量を*m*,降着する粒子の速度を*v*,天体の質量を*M*,天体の半径を*r*,重力定数を*G*とすると、自由落下の場合の重力エネルギーと運動エネルギーの関係は以下のようになる。

$$\frac{1}{2}mv^2 = G\frac{Mm}{r} \tag{2.1}$$

重力エネルギーは例えば、水素原子 (1.67 × 10²⁷ kg) を太陽質量の 1.4 倍、半径 10 km の中性子星に自由落 下させると約 194 MeV にもなる。もし、降着円盤のガスが熱運動する場合でも 1 keV 以上の高温になり、 高エネルギーの X 線を放射できる。

次に、単位時間あたりの放射エネルギーを示す輝度(L)を質量降着率(m)を用いて表すと、

$$L \le \frac{1}{2}\dot{m}v^2 = G\frac{M\dot{m}}{r} \tag{2.2}$$

となる。また、天体 (質量 M) の半径を R、シュヴァルツシルト半径を $r_s (\equiv \frac{2GM}{c^2})$ とすると

$$L = \frac{1}{2}\dot{m}c^2\frac{r_s}{R} \tag{2.3}$$

となる。したがって、サイズが r_s に近い BH や中性子星では、 $\dot{m}c^2$ (質量エネルギーが全て放射に転換した 場合) に近い放射が可能である。

次に降着円盤についてより詳しく述べる。降着円盤において、ガス降着に伴い解放された重力エネルギー が効率よく放射エネルギーに転換され、円盤は明るく光ると仮定しているのが「標準円盤モデル[3]」であ る。よって、放射でよく冷える(放射冷却)ため圧力が下がり、円盤は面に垂直方向に縮んで幾何学的に薄 くなる。



図 2.2: 降着円盤とコロナ [2]

また図 2.2 のように、円盤の持つエネルギーがガスの一部を加熱し、自身の周りに「コロナ」を形成する と考えられている。コロナは密度の薄い荷電粒子のプラズマ大気層であり、~100 keV もの高温になる。コ ロナ自身は密度が小さいため放射は弱いが、円盤からの放射はコロナ中の電子に散乱され、エネルギーを もらう。したがって、コロナからはより高いエネルギーの光子の放射が行われる。

2.2 偏光とは

光(電磁波)は電場ベクトル、磁場ベクトル、光の進行方向の3者が互いに直行している。電場と磁場 は横波であり、電場ベクトルと磁場ベクトルは常に振動を繰り返すが、その中でも特定の方向に振動する場 合、その光のことを「偏光」という。観測される自然光では、偏光のない光「無偏光」のものが多い。しか し、これらの自然光は細かく見るとランダムに偏光しているともいえる。つまり、無偏光の光は、「偏光し ていない光」ではなく「偏光した光が集まってできた光」なのである。

偏光を表す際、「ストークスパラメータ」を用い、偏光情報を表現することができる。以下ストークスパ ラメータについて、図 2.3 を元に説明していく。



図 2.3: 楕円偏光の様子

光の進行方向 (z 軸方向) に対して、垂直な 2 つの方向に電場の成分を E_x, E_y と分解し、電場の振幅 E_{x0}, E_{y0} 、波動の位相を $\omega t - \phi_x, \omega t - \phi_y(\omega, t, \phi \iota \delta \land \beta h k m)$,時間,初期位相) とすると以下のように なる。

$$E_x = E_{x0}\cos(\omega \ t - \phi_x) \tag{2.4}$$

$$E_y = E_{y0}\cos(\omega \ t - \phi_y) \tag{2.5}$$

この式は、 $E_{x0} = E_{y0}$ では円軌道を表す。従って電場ベクトルは、一般には楕円軌道を描く。楕円軌道の 長軸と短軸を X 軸, Y 軸とし、楕円の傾きを表すため x 軸と X 軸のなす角を χ (偏光方位角と呼ぶ)とする 。また、長軸と短軸の比を表す量として、角度 β を図の 2.3 のように定義する (tan $\beta = E_{y0}/E_{x0}$)。する と、角度 XY 座標での電場成分 E_X, E_Y は、

$$E_X = E_0 \cos \beta \, \cos \omega \, t \tag{2.6}$$

$$E_Y = E_0 \sin \beta \, \sin \omega \, t \tag{2.7}$$

と表すことができる。ここでは $\sqrt{E_{x0}^2 + E_{y0}^2} = E_0$ と表記した。 ω (つまりエネルギー) が与えられた場合 は $E_0, \beta,$ および XY 軸の傾きを表す χ の3つでこの電磁波を記述できることが分かる。

ここで以下のストークスパラメータを導入する。

$$I = E_{x0}^2 + E_{y0}^2 = E_0^2 \tag{2.8}$$

$$Q = E_{x0}^2 - E_{y0}^2 \tag{2.9}$$

$$U = 2E_{x0}E_{y0}\cos(\phi_x - \phi_y)$$
(2.10)

$$V = 2E_{x0}E_{y0}\sin(\phi_x - \phi_y)$$
(2.11)

I,Q,U,V間には $I^2 = Q^2 + U^2 + V^2$ となる関係があるため、独立な変数は3つである。また、3つの独立 した量 $E_0, \beta, \chi \ge I, Q, U, V$ には以下の関係が成り立つ。

$$E_0 = \sqrt{I} \tag{2.12}$$

$$\sin 2 \ \beta = \frac{V}{I} \tag{2.13}$$

$$\tan 2 \ \chi = \frac{U}{Q} \tag{2.14}$$

ストークスパラメータは次のような物理的意味をもつ。

・ 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を表し、V > 0の時は電磁波の進行方向から見て時計回りの楕円偏光、V < 0の時は反時計回りの楕円偏光、V = 0の時は直線偏光である。

・Q, Uはx軸に対する楕円偏光、直線偏光の傾きを表す。Q = U = 0の時は円偏光である。

このように完全に偏光された光はストークスパラメータを用いて表すことができる。しかし、実際は無偏 光な成分を持つ。そのため、偏光の度合いを表す「偏光度」を用い、偏光情報を表現する。偏光度Пは、全 強度 *I* と偏光部分の強度 *I*_{pol} によって以下のように表す。

$$\Pi \equiv \frac{I_{\rm pol}}{I} = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I}$$
(2.15)

直線偏光では、偏光面に偏光フィルターを平行 (X 軸方向) に置くと最大強度 I_{max} 、偏光面に垂直 (Y 軸方向) に置くと最小強度 I_{min} が得られる。また、無偏光成分の強度は X 軸, Y 軸方向に均等に分けられるの で、無偏光強度 I_{unpol} を用いて表すと、

$$I_{\rm max} = \frac{1}{2}I_{\rm unpol} + I_{\rm pol} \tag{2.16}$$

$$I_{\min} = \frac{1}{2} I_{\text{unpol}} \tag{2.17}$$

となる。ここで、 $I_{\rm unpol} = I - \sqrt{Q^2 + U^2}$ であり、 $I_{\rm pol} = \sqrt{Q^2 + U^2}$ を示す。したがって、偏光度は次のように表すことができる。

$$\Pi = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \tag{2.18}$$

2.3 装置のエネルギー応答

装置で天体のX線偏光観測を行う際、偏光度、偏光方位角のエネルギー依存性が重要である。しかし、 装置にはエネルギー分解能 (電磁波のエネルギー測定の精度を表す指標) があり、その値は必ず有限である。 したがって、エネルギー応答を考慮した解析、および感度評価を行う必要がある。エネルギー分解能 Δ*E* として FWHM(半値幅)の値を用いる時は、以下で計算することができる。

$$\Delta E = \frac{2.35\sigma}{E} \times 100 \tag{2.19}$$

ここでのσは測定されたエネルギーの広がりの標準偏差である。

本研究で扱う IXPE 衛星の望遠鏡では、文献 [6] より、エネルギー分解能の値が 2 keV で 27 %であることが分かっている。

2.4 BH 連星からの X 線偏光



図 2.4: コンプトン散乱 [7]

X線偏光を作るプロセスはいくつかあるがその一つが「コンプトン散乱 (図 2.4)」である。X線が物質中の電子と衝突した際、電子にエネルギーを与えるもしくは吸収を行い、電子 (反跳電子とも呼ぶ) が反跳角 ϕ で突き飛ばされ、X線が散乱角 θ で散乱される。この時、電場ベクトルに対する散乱方位角を η とする。 散乱方位角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への依存性) は、全コンプトン断面 積を σ_c , 立体角を Ω, 古典的電子半径を r_e , 入射光子のエネルギーを $h\nu$, 散乱光子のエネルギーを $h\nu'$ で表 すと、

$$\frac{d\sigma_c}{d\Omega} = \frac{1}{2} r_e^2 \left(\frac{h\nu'}{h\nu}\right)^2 \left(\frac{h\nu}{h\nu'} + \frac{h\nu'}{h\nu} - 2\sin^2\theta\cos^2\eta\right)$$
(2.20)

となる。この式 (Kline-Nishina の式) から、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 いということがわかる。このことを利用し偏光を測定する。BH 連星では、降着円盤やコロナによりコンプ トン散乱が起きるため、ジオメトリによっては偏光が生じる。以下、BH 連星からの X 線が、観測者の元 に届くまでのプロセスを考えていく。まず BH 連星からやって来る X 線は以下の3つのパターンが考えら れる。

1. 円盤の表面からの光 (熱運動するガスからの放射) は無偏光である

円盤は高温であるため、円盤の中心から表面に至るまで X 線放射する。円盤の表面から放射され、ガ

スにぶつかることなく直接観測者の元に届いた場合、熱運動 (ランダムな運動) をするガス起源の放射 なため無偏光となる。

2. 円盤の中心→円盤の表面→観測者というプロセスで届く光は一部偏光している

円盤の中心から出た光は円盤内に存在するガスとぶつかりコンプトン散乱する。その散乱回数は1回 のものもあれば、複数回のものもある。また観測される偏光 X 線は、垂直に偏光されやすいという コンプトン散乱の性質を受けて偏光したものなので、観測者から見て円盤面が平行であると仮定する と、円盤に対して垂直に散乱し偏光されたものであることがわかる。

3. コロナで散乱された光はジオメトリ次第で一部偏光している

円盤の中心または表面から放射された光は、円盤表面で偏光される場合と同じように、円盤を取り囲んでいるコロナにぶつかって散乱する場合もある。

以上のように想定される。BH 連星からの光は (2),(3) のような場合、程度に差はあるものの、コンプトン 散乱により偏光している。

さらに BH 近傍の光は、一般相対性理論効果で光の進路が曲がるため、偏光の生じ方が変わってくる。以下それを説明する。

まず、重力の影響を無視できる場合 (特殊相対性理論) を考える。時空の間隔 ds^2 は時空座標 (x, y, z, t), 光速 c を用いて以下の式で表すことができる。

$$ds^{2} = c^{2}dt^{2} - (dx^{2} + dy^{2} + dz^{2})$$
(2.21)

また、この式は $r \ge \theta \ge \phi$ を用いて極座標で表すこともできる。

$$ds^{2} = -dt^{2} + dr^{2} + r^{2}(d\theta^{2} + \sin^{2}\theta d\phi)$$
(2.22)

重い天体の近くでは、重力の影響で時空がゆがみ (一般相対性理論)、間隔の表式が変わる。回転しない BH(Schwarzschild black hole)の場合、その半径 をr,質量をMとし、また、重力定数をGとすると、

$$ds^{2} = \left(1 - \frac{2GM}{rc^{2}}\right)c^{2}dt^{2} - \left(1 - \frac{2GM}{rc^{2}}\right)^{-1}dr^{2} - r^{2}(d\theta^{2} + \sin^{2}\theta d\phi^{2})$$
(2.23)

となる。



図 2.5: 光が時空のゆがみにより曲がる様子 [9]

この時、光の性質から時空のゆがみで光の進行方向は曲がることから(図 2.5)、光は偏光され観測者の元 に届く。また、BHにより近い空間では、時空のゆがみの程度が大きく光の曲がり方も大きいため、偏光の され方も大きくなる。特に BH が回転する場合は、エネルギーに依って偏光情報は変化する。

ここまで述べたことをまとめると、時空がゆがむと光が曲がり偏光のしかたが変わり、かつそれは BH の 回転によって違いがあることが分かった。相対論効果は BH 近傍で強く、BH 近くの光は高いエネルギーの X 線を出すので、BH の近くまで円盤が存在するため、偏光情報 (偏光度、方位角) が大きなエネルギー依 存性を持つ。



図 2.6: GRS1915+105のBHの回転ありと回転なしの偏光度と偏光方位角のグラフ [10]

実際には、BH のまわりの降着円盤からの光がどう伝わるか (光子伝搬)を相対論効果 (光の進路の曲 がり)を考慮して考える必要がある。具体的な計算は、M. Dovciak らにより行われており、GRS1915+105 の BH が光速度回転している場合 (図中の a = 1 のグラフ) と回転がない場合 (図中の a = 0 のグラフ)の偏 光度 (Degree of Polarization)、偏光方位角 (Angle of Polarization)を表したものが図??である。偏光度の 縦軸は、100%偏光しているものを 1.00 としている。図 2.6 を見てもわかるように、回転しない BH より、 回転する BH の方が、エネルギー依存性が大きくなっている。

これらのことから、BH 連星の X 線偏光観測を行う場合、コンプトン散乱の影響に加えて、一般相対性 理論の時空のゆがみについても考慮する必要があるといえる。逆に、X 線偏光の観測 (特にエネルギー依存 性の測定) から、一般相対論効果の検証や BH の回転の測定が可能である。

第3章 IXPE衛星とシミュレーションソフト ウェア



図 3.1: IXPE 衛星イメージ図 [11]

3.1 IXPE 衛星の概要

IXPE 衛星 (図 3.1) とは、NASA と ASI(Italian Space Agency) 主導の X 線偏光観測衛星である。打ち 上げは、2021 年 4 月にアメリカで予定されている。IXPE 衛星には、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 台が搭載される。これらにはその主要コンポーネ ントとして、日本から提供される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 ルシールドが用いられる。また、観測できるエネルギー帯は、2 ~ 8keV、望遠鏡の視野は 12.9 分角× 12.9 分角である。X 線の偏光情報、エネルギー、タイミング、イメージと多くの情報を得られるということで、 これまで行うことができなかった高エネルギー天体の X 線偏光観測が、多くの天体に対して可能になると 期待されている。

3.2 X線偏光検出器



図 3.2: 検出器 (GDP)[12]

IXPE 衛星に搭載される検出器は、図 3.2 のような光電効果を利用した焦点面ガス検出器 (Gas Pixel Detectors:GDP) である。以下の表は検出器のパラメータ情報である (文献 [12])。

パラメーター	值
感度面積 (Sensitive area)	$15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$
封入したガス (Fill gas and composition)	水素 (20 %)/ジメチルエーテル (80 %) を l 気圧
検出窓 (Detector window)	ベリリウム, 厚さ 50 µm
吸収領域の厚み (Absorption and drift region depth)	$10 \mathrm{mm}$
GEM の穴の間隔 (GEM hole pitch)	$50~\mu{ m m}$
読み出しピクセルの数 (Number readout pixels)	300 imes 352 個
ピクセルアノード (Pixelated anode)	50 µm 間隔, 六角形
空間分解能 (Spatial resolution「FWHM」)	$\geq\!\!123~\mu\mathrm{m}(6.4$ 秒角)@2 keV
エネルギー分解能 (Energy resolution「FWHM」)	$0.54~{\rm keV}@2~{\rm keV}~({\propto}{\rm E})$

次に X 線の検出方法について述べる。以下のような 3 ステップで入射 X 線を検出し、エネルギー、位置、 そして偏光情報を測定する。

1. 入射した X線が検出器中のガスと光電効果を起こす

ガスが封入された厚さ 10 mm、面積 15 mm × 15 mm の空間で入射 X 線が光電効果をおこすと光電 子が放出される。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。多くの場合、図 3.3 のように K 殻電子が放



図 3.3: K 殻電子の放出 [13]

出される (つまり K 殻の電子の反応確率が高い)。また、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、 $E = W - h\nu$ で表すことができる。光電効 果の反応断面積 σ_{ph} 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_ec^2 を電子の静止質量エネルギー (0.511 MeV) とすると、以下のように表すことができる。

$$\sigma_{ph} \approx \sigma_T 4\sqrt{2} (\frac{1}{137})^4 Z^5 (\frac{m_e c^2}{h\nu})^{\frac{7}{2}}$$
(3.1)

この式からもわかるように、原子番号が大きいほど光電効果は起きやすい。また、散乱角度の断面積



図 3.4: 光電子の放出角度分布 [14]

は、入射光子の進行方向と光電子の射出方向のなす角 $\phi \in \theta$ 、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 、光電子の速度をv、光速との比を $\beta = \frac{v}{c}$ を用いて以下のように表すことがで きる。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \phi}{(1 - \beta \, \cos \theta)^4} \tag{3.2}$$

cos² φ が光電子の射出方向の方位角依存性を表す。従って、光電子は入射光子の電場ベクトル方向に 放出されやすいことがわかる。このように、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。

2. ガス電子増幅フォイル GEM で電場により光電子が加速。衝突を繰り返し増幅

ガス電子増幅フォイル GEM(Gas Electron Multiplier) は、110 mm × 90 mm の大きさで穴径 30 μ m の穴が 50 μ 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し電子を 増幅させる増幅器である。衝突した際、2 個以上の二次電子が放出するため、この過程が何度も繰り 返され、数千倍にまで増幅される。

3. 電荷読み出しパッドで電気信号の読み出しを行う

電子を読み込むためのパッドが 300 × 352 個あり、それぞれが電気信号の読み出し部分に繋がってい る。これにより増幅された電子雲をイメージングし、その形状から光電子の放出方向を推測すること ができる。また、GEM で電子が増幅されているため、ノイズと電気信号を分離することができる。

以上のように検出器で偏光情報を観測することができるが、2.3 でも述べたように装置には必ずエネル ギー分解能が存在し、単色 X 線を観測した場合であってもエネルギーに依存した広がりができてしまう。そ のため、この装置のエネルギー分解能を考慮した上で解析を進める必要がある。この装置は表のパラメー タ情報 (文献 [13]) にあるように、2 keV で FWHM(半値幅) が 0.54 keV である。したがって、式 (2.19 式) よりエネルギー分解能 27 %であることがわかる。

最後に偏光検出器能力を表す「モジュレーションファクター」について述べる。モジュレーションファク ター μ_{100} は装置の偏光測定能力の指標である。電子雲の形状から入射光子の偏光方向を測るが、検出の原 理および有限な装置の能力のため、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な い。そのため、観測された偏光度をこの μ_{100} で割ることで真の偏光度を算出する。 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 $N_{\rm max}$ と、振幅が最小となる最小強度 $N_{\rm min}$ から以下のよ うに定義される。

$$\mu_{100} = \frac{N_{\max} - N_{\min}}{N_{\max} + N_{\min}}$$
(3.3)

図 3.5 は各エネルギーにおいて µ100 のグラフである。また、偏光を観測し、得られたモジュレーションを µとすると、観測の偏光度 P.D.(%) は、以下のように求めることができる。

$$PD = \frac{\mu}{\mu_{100}} \times 100 \tag{3.4}$$

3.3 IXPEOBSSIM

IXPE 衛星によって観測されたデータを解析することは簡単ではなく、打ち上げ前に IXPE 衛星から送ら れてくるデータをシミュレーションしておきデータを蓄積させることが必要である。ここで「IXPEOBSSIM」 という専用のシミュレーションソフトウェアを使用する。IXPEOBSSIM でシミュレーションを行うには Python やライブラリを用いるため、anaconda3 というオープンソースを用いる。図 3.3 は IXPEOBSSIM



図 3.5: 100 % 偏光を入射させた際のモジュレーションファクター [15]

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、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行う。 出力結果は、「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。中身を確認する際は、「HeaSoft」という X 線天文学の標準的な解析フレームワークを使用することで 可能になる。



第4章 X線偏光シミュレーションの結果

4.1 シミュレーションおよび解析方法

X線天体の偏光情報、ひいてはその物理量を求めるには、得られたデータを解析すればよい。その際、 装置の応答 (エネルギー分解能、有効面積、モジュレーションファクター μ100) はエネルギーに依存した関 数を持つ。従って、それらを考慮する必要がある。そこで本研究では、装置の応答を考慮して観測データの シミュレーションおよび解析を行う。以下ではその手順と実際に行った結果について述べる。

1. IXPEOBSSIM を用いてシミュレーションする

```
model___ = file_path_to_model_name(__file__)
E0 = 1.0
ra, dec = 45., 45.
pl_norm = 10.
pl index = 2.
pol_deg = constant(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)</pre>
    energy = energy[mask]
    flux = flux[mask]
    fmt = dict(xlabel='Energy [keV]',
               ylabel='Flux [cm$^{-2}$ s$^{-1}$ keV$^{-1}$]')
    return xInterpolatedUnivariateSplineLinear(energy, flux, **fmt)
data_spline = parse_spectral_data('2keV.txt')
def spec(E, t):
    return data_spline(E)
src = xPointSource('Point source', ra, dec, spec, pol_deg, pol_ang)
ROI MODEL = xROIModel(ra, dec, src)
```

図 4.1: 2 keV の単色 X 線をシミュレーションするときに使用するコンフィグレーションファイルを例とし てあげる。下から 5 行目では 2 keV の ascii ファイル 2 keV.txt が読み込まれている。

まず IXPEOBSSIM でシミュレーションを行うための設定を行う。toy-point-source という Power law や単色 X 線をシミュレーションするコンフィグレーションファイルを用い (図 4.1 では例として 2 keV の単色 X 線をシミュレーションするときに使用するコンフィグレーションファイルをあげている)、そこ で天体の位置 (ra0.dec0) や望遠鏡を向ける向き (ra1,dec1)、偏光度 (pol-deg) と偏光方位角 (pol-ang)、 スペクトルのファイル、空間分布を設定していく。下から 2 行目 ("src="で始まる行) は、座標、ス ペクトル、偏光情報を持った X 線源を作成する箇所であり、細かな設定としてテキストファイルを読 みこむことができる。このファイルは ascii ファイルとであり、図 4.2 では左の列がエネルギー (keV)、 右の列がフラックス (counts/sec/cm2/keV) を指定している。この例では 2keV の単色 X 線を打つ設 定となっている。

> 0.0 0 1.0 0 1.9 0 1.95 10 2.0 20 2.05 10 2.1 0 3.0 0 4.0 0 5.0 0 6.0 0 7.0 0 8.0 0 9.00 10.0 0 11.0 0 12.0 0 13.0 0 14.0 0 15.0 0 16.0 0

図 4.2: 2 keV の単色 X 線の ascii ファイル (左の列がエネルギー、右の列がフラックスを設定している)

設定ができたら、次にシミュレーションを行う。

xpobssim – configfile [ファイル名.py] – duration [観測時間 (s)] (4.1)

とコマンドを実行することで、シミュレーションが開始される。これにより得られたデータは fits 形 式のファイルで保存される。

2. fv コマンドでテキストファイルを作成する

	TRG_ID	SEC	MICROSEC	TIME	PHA	PI	ENERGY	DE TX	DETY	RA	DEC	X	Η Υ	DE TPHI	PHI	PHE_U	PHE_Q
Select	J	J	J	D	J	E	E	E	E	E	E	I	I	E	E	E	E
A 11		s	us	s			keV	nm	RP.	deg	deg	pixel	pixel	rad	rad		
Invert	Modify	Modify	Modify	Modify	Modify	Modify	Modify	Modify	Modify	Modify	Modify	Modify	Modify	Modify	Modify	Modify	Modify
1	1	0	17175	1,717562204206E-02	28	2,800000E+01	2.127902E+00	3.587470E-01	1.770744E+00	4.499857E+01	4,499660E+01	452	444	1.152297E-01	2.017639E+00	-1,558771E+00	-1.253089E+00
2	2	0	54823	5.482327351669E-02	30	3.000000E+01	2.209300E+00	8.012957E-01	1.849796E+00	4.500300E+01	4.500223E+01	447	455	-2.959735E+00	-1.057326E+00	-1.711440E+00	-1.034879E+00
3	3	0	68988	6.898852274795E-02	38	3.800000E+01	2.526280E+00	1.522216E+00	3.766077E+00	4.504446E+01	4.500305E+01	394	456	2.278971E+00	-2.101805E+00	1.746680E+00	-9.742224E-01
4	4	0	102570	1.025708079796E-01	26	2.600000E+01	2.046744E+00	5.086621E-01	1,612826E+00	4.499653E+01	4.499937E+01	455	449	2.545361E+00	-1.835416E+00	1.009753E+00	-1.726383E+00
5	5	0	110895	1,108955967983E-01	24	2,400000E+01	1.996255E+00	8,521151E-01	2,024122E+00	4.500668E+01	4.500210E+01	442	454	2.212488E+00	-2,168288E+00	1.860419E+00	-7.340576E-01
6	6	0	185473	1.854734193024E-01	20	2,000000E+01	1.800864E+00	5.334591E-01	1.411127E+00	4.499284E+01	4.500064E+01	460	452	5.561170E-01	2,458526E+00	-1,958259E+00	4.064741E-01
7	7	0	192778	1.927788524715E-01	40	4.000000E+01	2.608264E+00	1.111770E+00	1.861342E+00	4.500527E+01	4.500638E+01	444	462	-2.154055E+00	-2.516461E-01	-9.646242E-01	1.751999E+00
8	8	0	226792	2.267920930752E-01	27	2.700000E+01	2.110867E+00	8.111289E-01	1,759714E+00	4.500135E+01	4.500278E+01	449	456	-1.193374E+00	7.090346E-01	1.976720E+00	3.042684E-01
9	9	0	238272	2,382724272536E-01	24	2,400000E+01	1.996585E+00	6.351672E-01	1.768132E+00	4.500035E+01	4.500036E+01	450	451	-2.344629E+00	-4.422201E-01	-1.547121E+00	1.267445E+00
10	10	0	294683	2,946835981789E-01	18	1.800000E+01	1.721231E+00	3.155316E-01	2.016276E+00	4,500299E+01	4.499487E+01	447	441	1,535212E+00	-2.845564E+00	1,116138E+00	1.659589E+00
11	11	0	330943	3.309435340586E-01	24	2.400000E+01	1.996822E+00	6.293212E-01	1.545342E+00	4.499604E+01	4.500132E+01	456	453	8.234463E-01	2.725855E+00	-1.477852E+00	1.347573E+00
12	12	0	335834	3.358347532229E-01	25	2.500000E+01	2.022897E+00	3.788453E-01	1,699824E+00	4.499735E+01	4.499720E+01	454	445	-2.251442E+00	-3.490335E-01	-1.285476E+00	1.532172E+00
13	13	0	350293	3,502937967388E-01	35	3.500000E+01	2.423132E+00	6.414691E-01	1.636431E+00	4.499787E+01	4.500106E+01	453	452	1.367029E+00	-3.013747E+00	5.058286E-01	1.934977E+00
14	14	0	356422	3,564226513852E-01	28	2,800000E+01	2.134124E+00	1.055976E+00	1,648769E+00	4.500084E+01	4.500661E+01	449	462	-1,289350E+00	6.130584E-01	1,882368E+00	6.757899E-01
15	15	0	367576	3.675763537806E-01	31	3.100000E+01	2.267042E+00	3.260903E-01	1.965162E+00	4.500209E+01	4.499525E+01	448	442	2.616421E+00	-1.764356E+00	7.550431E-01	-1.852002E+00

図 4.3: fv で確認した単色 X 線 (2 keV) の光子情報

シミュレーションで得られたデータは HeaSoft 群の fv で図 4.3 のように確認できる。出力された fits ファイルがあるディレクトリで以下のようなコマンドを実行することで確認することが可能である。

このファイルはテキストファイルとして書き出すことができるので、エクスポートし作成されたテキ ストファイルを保存し、自分で必要な解析を行う。

3. less コマンドで必要なデータの行を確認し、awk コマンドで切り取りを行う

切り取りは以下のように awk コマンドを実行し、切り取りを行う。

awk '{print \$(切り取る列)"\t"\$(切り取る列)}' (テキストファイル) > (dat ファイル) (4.3)

切り取りとられた際、図 4.4 のように dat ファイルとして生成される。この例では左の列が光子番号、 右の列がエネルギーを切り抜いている。

1	2.127902E+00
2	2.209300E+00
3	2.526280E+00
4	2.046744E+00
5	1.996255E+00
6	1.800864E+00
7	2.608264E+00
8	2.110867E+00
9	1.996585E+00
10	1.721231E+00
11	1.996822E+00
12	2.022897E+00
13	2.423132E+00
14	2.134124E+00
15	2.267042E+00
16	1.781932E+00
17	1.642033E+00
18	2.385643E+00

図 4.4: 2keV の単色 X 線のシミュレーション結果から切り抜かれた dat ファイル (左の列が光子番号、右の 列がエネルギー)

4. ROOT フィッティングやグラフ表示を行う

```
// parameter to construct histogram
#define NUM 1024 //width of bin
#define MIN 0 //min x-cordinate
#define MAX 10 // max x-cordimate
// parameter to fit histogram
#define xMin 1.2 //xmin fit
#define xMax 3// xmax fit
#define NPAR 1
void toy point_source_2keV_pol0_dul_t1(){ //same with "~~".cc
TCanvas* cl = new TCanvas("cl", "cl"); // create canvas to dras histogram
c1->SetGrid();
c1->SetTicks();
char name[20], title[100]; // constract histogram to store data
sprintf(name, "Details"); // title of box
sprintf(title, "ENERGY HIST 2keV"); // title of hist
TH1F* h1 = new TH1F(name, title, NUM, MIN, MAX); // TH1F* spc = new TH1F(name, title, 100, 0, 4);
h1->GetXaxis()->CenterTitle(1);
h1->GetXaxis()->SetTitle("ENERGY HIST");
h1->GetYaxis()->CenterTitle(1);
h1->GetYaxis()->SetTitle("NUMBER");
ifstream fin("toy point source 2keV pol0 dul t1.dat"); //roading data file
int nn = 1; // read data and store histogram
double n,energy; // double -> definne n->number of event , energy
  while (fin>>n>>energy){
    h1-> Fill(energy); //fill energy hist
  nn = nn+1;
ļ
h1->Draw(); //draw histogram
// fit the data with a gaussian functio
TF1* f1 = new TF1("f1", "[0]*exp(-0.5*((x-[1])/[2])**2)+[3]*x+[4]",
double mu = (double(xMin)+double(xMax))/2.;
double sigma = (double(xMax)-double(xMin))/2.35/2;
f1->SetParameters(100, mu, sigma, 0, 0);
f1->SetLineColor(2); // red
f1->FixParameter(3, 0);
f1->FixParameter(4, 0);
hl->Fit("f1", "VRL"); // perform the fittin step by step
c1->Update();
fin.close();
}
  図 4.5: 2 keV の単色 X 線のシミュレーション結果を元に、ROOT でグラフを表示させるために作成した
  プログラム
```

こうして得られたデータは ROOT を用いて解析する。ROOT は C++を用いて自由に演算を行うこと が可能であり、フィッティングやグラフ表示が可能である。図 4.5 は 2 keV の単色 X 線のシミュレー ション結果を元に、ROOT でグラフを表示させるために作成したプログラムの例である。

とコマンドを実行し、ROOT を起動させてヒストグラムを表示させる。図 4.6 では 2 keV の単色 X 線のシミュレーション結果を ROOT で表示およびフィッティングを行った。

4.2 エネルギー分解能の測定

エネルギー分解能のエネルギー依存性を見るために 1.5,2,2.5,3,4,5,6,7,8,9 keV で単色 X 線を観測したと 仮定して、各エネルギーごとに 1000 秒間観測シミュレーションを行った。図 4.2 では 2 keV の単色 X 線を シミュレーションする際に詳細な設定を行うことのできる ascii ファイルで、単色 X 線の半値幅が大きくな らないよう、1.95keV,2.05keV でフラックスを 10 に設定した。図 4.6、図 4.7 は各々2 keV の単色 X 線、8 keV の単色 X 線に対してシミュレーションを行った結果である。



図 4.6:8 keV のヒストグラムおよびフィッティング



図 4.7:8 keV のヒストグラムおよびフィッティング

次にこうして得られたエネルギー分解能をエネルギーの関数としてプロットし、両対数グラフで表示さ せたのが図 4.8 である。



Energy_Resolution

エネルギー分解能は指数関数的に減少していることがわかった。これは光電子数のポアソンゆらぎによ

るものだと考えられる。

4.3 Power law での X 線偏光観測シミュレーション

```
一定の偏光度,偏光方位角でのシミュレーションと解析
4.3.1
       _model__ = file_path_to_model_name(__file__)
     ra, dec = 45., 45.
     pl norm = 10.
     pl index = 1.
     spec = power law(pl norm, pl index)
     pol deg = constant(0.5)
     pol ang = constant(numpy.radians(30.))
     src = xPointSource('Point source', ra, dec, spec, pol deg, pol ang)
     ROI MODEL = xROIModel(ra, dec, src)
     def display(emin=1., emax=12.):
         """Display the source model.
         .....
         energy = numpy.linspace(emin, emax, 100)
         # Energy spectrum
         plt.figure('%s spectrum' % model )
         plt.plot(energy, spec(energy))
         setup gca(xmin=emin, xmax=emax, ymin=spec(emax), logx=True, logy=True,
                   grids=True, **fmtaxis.spec)
     if name == ' main ':
         from ixpeobssim.config import bootstrap_display
```

```
bootstrap_display()
```

図 4.9: Power law のコンフィグファイル (toy_point_source)

天体からの X 線は強度がエネルギーの指数関数になることが多い。そこで初めに指数関数 (Power law) で冪指数を変更させたものでシミュレーションを行った。コンフィグファイルで図 4.9 のように pl_index を 設定することで冪指数を変更させてシミュレーションすることができる。観測時間を 1000 秒とし、そのシ ミュレーション結果を両対数グラフでプロットした (図 4.10, 図 4.11)。



図 4.11: 冪指数 2

この2つのグラフから冪指数が大きい2の方が2~8 keV(IXPE 衛星で観測できるエネルギー帯) で傾きが大きくなることが確認できた。

次にこの Power law のコンフィグレーションファイル (toy-point-source) を用いて、シミュレーション結果 (光子数、エネルギー、ストークスパラメータ Q、U) を元に偏光度、偏光方位角を算出した。冪指数は2とし、 誤差を小さくするため 10⁵ 秒と観測時間を増やしてシミュレーションを行った。この時、toy-point-source のコンフィグレーションファイルによって偏光度が 50 %, 偏光方位角が 30 度と設定した。Q、Uを用いて 偏光度は $\frac{\sqrt{Q^2+U^2}}{\mathcal{K}^2\mathfrak{H}} \times \frac{1}{\mu_{100}}$ 、偏光方位角は $\tan^{-}(\frac{Q}{U})$ として求めることができる。こうして得られた偏光度、 偏光方位角を表 4.12、図 4.13、図 4.14 にまとめる。

	Q	U	光子数	√Q^2+U^2	√Q^2+U^2/光子数	μ100	偏光度	偏光方位角	設定偏光度	設定方位角
2~	142252	252969	2813370	290222.236	0.10315822	0.2	0.51579109	29.3503439	0.5	30
2.5~	130392	227839	1704040	262512.254	0.15405287	0.31	0.49694474	29.7824569	0.5	30
3~	92302	157721	931993	182744.557	0.19607932	0.4	0.49019831	30.3371641	0.5	30
3.5~	57343	98788	516390	114224.728	0.22119857	0.45	0.49155237	30.1336754	0.5	30
4~	35537	60540	298111	70199.5012	0.23548108	0.48	0.49058559	30.4129481	0.5	30
4.5~	21899	39237	177757	44934.4898	0.25278605	0.52	0.48612702	29.1668107	0.5	30
5~	14686	24932	108437	28935.8466	0.26684477	0.55	0.48517231	30.49988	0.5	30
5.5~	9414	16359	69234	18874.3285	0.27261647	0.57	0.4782745	29.9188364	0.5	30
6~	6390	10604	44384	12380.5055	0.27894073	0.58	0.4809323	31.0732843	0.5	30
6.5~	4295	7578	28354	8710.51715	0.30720594	0.6	0.5120099	29.5433605	0.5	30
7~	2771	4399	16588	5199.00394	0.31341958	0.62	0.50551545	32.2074777	0.5	30
7.5~8.0	1590	2235	8834	2742.86802	0.31048993	0.64	0.48514051	35.4284043	0.5	30

図 4.12: Power law 偏光情報算出表



図 4.13: Power law の偏光度



図 4.14: Power law の 偏光方位角

このグラフから、シミュレーションされた偏光度、偏光方位角が設定した値を正しく出力できているこ とが確認できた。ここで、設定した値とシミュレーションした値に若干のずれが見受けられるが、装置の有 効面積がエネルギーに依存すること、4.2 に示したようにエネルギー分解能が有限であること、モジュレー ションファクター µ100 が原因と考えられる。

4.3.2 スペクトルフィットを用いた解析

4.3.1 ではシミュレーションで出力された光子数、エネルギー、Q、Uを用い、モジュレーションファク ター μ₁₀₀ を考慮した上で手動で偏光度、偏光方位角を算出した。より精度の良い解析では、有効面積がエ ネルギーに依存すること、エネルギー分解能が有限かつエネルギーに依存することを取り込んで解析する 必要がある。IXPEOBSSIM にはエネルギー応答をフルに取り込んで自動でシミュレーションを行い、また Q、Uから偏光度、偏光方位角を算出する機能が搭載されている。具体的には以下の3つのコマンドを実行 することで、スペクトルフィットされたグラフが出力され、シミュレーション結果から偏光度、偏光方位角 の値が自動で算出される。

まず example のディレクトリ内に含まれている toy-point-source.py ファイルを python で実行させる。

このままでは、できた fits ファイルのカラムが不十分なためスペクトル解析が走らない。そこでシミュレー ションで出力された fits ファイルの中身を書き換え、BACKFILE という変数を指定する。

最後にスペクトルフィットおよび偏光度, 偏光方位角の値が出力を行う。



図 4.15: 光子数のフィット



このような手順で作業を進めると図 4.15, 図 4.16, 図 4.17 が出力される。また、偏光度、偏光方位角においては、グラフ出力の際、log の最後に表示される。偏光度は 0.5001±0.0015 と約 50 % であり, 偏光方位角

は 0.5258±0.0015 で、度数法 (deg) に変換すると約 30 度である。従って、

となり、スペクトルフィットの手法を用いて偏光度、偏光方位角を正しくかつ精度良く求めることができる とわかった。

4.4 BH 連星からの X 線偏光観測シミュレーション

続いて BH 連星の偏光観測シミュレーションを行う。IXPEOBSSIM には、BH 連星 GRS1915+105 を スピンパラメータ0.0の Schwarzschild black hole と仮定した場合とスピンパラメータ0.998の Kerr black hole と仮定した場合の2つについてモデルの一例が与えられており、そのファイルを用いる事とした。た だし偏光度は数%と小さく長時間観測をしないと傾向がつかめないが、ファイルサイズが巨大で解析がし づらい。そこでまず最初のステップとして、観測時間を現実的な値である 3 × 10⁵ 秒とし、図 4.18 のよう に ascii ファイル (Polarization_spin のテキストファイル) に修正を加え、偏光度を 10 倍にした上でシミュ レーションした。

> 0.263433 25.9024 89.885 0.294481 25.8106 89.897 0.329188 25.7031 89.910 0.367986 25.5789 89.927 0.41356 25.5789 89.927 0.413868 25.7031 89.917 0.514034 25.0797 90.002 0.574618 24.857 90.607 0.18048 24.2908 90.147 0.642342 24.5872 90.867 0.18048 24.2908 90.147 0.802677 23.9546 90.222 0.897279 23.5711 90.317 1.08030 23.1433 90.437 1.12125 22.6731 90.5885 1.2534 22.1633 90.7765 1.46112 21.6215 91.0877 1.56626 21.0554 91.288 1.75686 20.4868 91.621 0.95721 19.9166 92.0889 2.18788 19.3513 92.4592 2.44575 18.8366 92.9356 2.734 18.3529 93.4572 3.05623 17.9169 93.9964 3.41643 17.5386 94.5402 3.41644 17.5386 94.5402 3.81099 17.2166 95.0659 5.3344 16.3551 96.4259 5.9636 16.4027 96.7869 6.66646 16.26549 97.1849 6.66646 16.26559 97.6355 3.33447 15.9551 97.8555 3.33447 15.9559 49.78575 10.4098 15.4559 98.6549 11.6367 14.974 98.2186 13.0802 14.1547 98.3159 14.5414 12.5979 98.2398 18.171 99.441 13.0116 0.532 7.629 96.6783 18.171 99.441 30.615

図 4.18: 偏光度 (真ん中の行)を 10 倍した Polarization_spin0.0_r30.txt(一部抜粋) である。左の列はエネル ギー、右の列は偏光方位角を示す。

シミュレーション結果は図 4.19、図 4.20、図 4.21、図 4.22、図 4.23、図 4.24、表 4.25、表 4.26、図 4.27、 図 4.28、図 4.29、図 4.30 のようになった。



図 4.19: シミュレーションで得られたスピンパラメー 図 4.20: シミュレーションで得られたスピンパラメー
 タ 0.0 の光子数
 タ 0.998 の光子数



図 4.21: シミュレーションで得られたスピンパラメー 図 4.22: シミュレーションで得られたスピンパラメー タ 0.0 の Q タ 0.998 の Q



図 4.23: シミュレーションで得られたスピンパラメー 図 4.24: シミュレーションで得られたスピンパラメー タ 0.0 の U タ 0.998 の U

	Q	U	光子数	√Q^2+U^2	√Q^2+U^2/光子数	μ100	偏光度	偏光方位角
2~	230259	-23793	6350430	231485.019	0.03645187	0.2	0.18225933	-84.100481
2.5~	203288	-23888	3999710	204686.706	0.05117539	0.31	0.16508189	-83.298013
3~	119750	-16682	1935960	120906.375	0.06245293	0.4	0.15613233	-82.069342
3.5~	60830	-8729	859443	61453.1068	0.07150341	0.45	0.15889647	-81.833901
4~	26115	-5658	374512	26720.8942	0.07134857	0.48	0.14864285	-77.775401
4.5~	12089	-2231	159490	12293.1396	0.07707781	0.52	0.14822655	-79.543828
5~	5235	-1164	67440	5362.84635	0.07952026	0.55	0.14458229	-77.464239
5.5~	2443	-720	28557	2546.89006	0.08918619	0.57	0.156467	-73.578721
6~	1148	-89	12388	1151.44474	0.0929484	0.58	0.16025586	-85.566947
6.5~	410	-59	5172	414.22337	0.08008959	0.6	0.13348265	-81.811213
7~	203	-63	2014	212.55117	0.10553683	0.62	0.17022069	-72.758541
7.5~8.0	58	-37	726	68.7968023	0.09476144	0.64	0.14806474	-57.464933

図 4.25: 偏光情報算出表 (スピンパラメータ 0.0)

	Q	U	光子数	√Q^2+U^2	√Q^2+U^2/光子羹	μ 100	偏光度	偏光方位角
2~	37394	-23793	1894340	44321.75634	0.023396938	0.2	0.116984692	-57.5322779
2.5~	41750	-23888	1680760	48100.9256	0.028618557	0.31	0.092317925	-60.2232058
3~	26827	-16682	1169020	31590.77481	0.027023297	0.4	0.067558243	-58.125155
3.5~	15611	-8729	757002	17885.71391	0.023627037	0.45	0.052504526	-60.7879561
4~	7413	-5658	484673	9325.531245	0.019240872	0.48	0.04008515	-52.6471806
4.5~	3806	-2231	309693	4411.688679	0.014245361	0.52	0.027394926	-59.622033
5~	1673	-1164	200431	2038.093472	0.010168554	0.55	0.01848828	-55.1714973
5.5~	1251	-720	130423	1443.399113	0.01106706	0.57	0.019415894	-60.0778701
6~	-550	-89	85904	557.1543772	0.006485779	0.58	0.011182378	80.80817813
6.5~	-506	-59	54362	509.4281107	0.009371033	0.6	0.015618389	83.34929872
7~	-692	-63	31940	694.8618568	0.021755224	0.62	0.035089071	84.79810584
7.5~8.0	-253	37	23841	255.69122	0.010724853	0.64	0.016757583	-81.6797575

図 4.26: 偏光情報算出表 (スピンパラメータ 0.998)



図 4.27: 偏光度 (スピンパラメータ 0.0)

スピンパラメータ0.998



図 4.28: 偏光度 (スピンパラメータ 0.998)









まず、BHの回転による違いとして、スピンパラメータ 0.0(4.25) とスピンパラメータ 0.998(表 4.26) で、 高エネルギーでの光子数減少の様子に違いがみられる。どちらも観測時間は 3×10⁵ 秒であるが、回転のな い BH は回転がある BH に比べ、高いエネルギーでの光子数の減衰の様子が大きい。これは、BH が回転す ると降着円盤が BH 付近まで近づくことができるため、高い運動エネルギーを持つ光子が多くなることを 反映している。

次に図 4.27、図 4.28 から回転の存在する BH では、偏光度と偏光方位角に大きなエネルギー依存性が現 れることがみてとれる。このようになる要因は、BH の回転で降着円盤が BH に接近できることにある。2 章で述べたように BH の付近で X 線の放射が行われると、一般相対論効果の影響を大きく受け、偏光情報が エネルギーに依存して変化するのである。特に偏光方位角の変化は、無偏光成分の大小によらないため、一 般相対論効果の強い証拠になると考えられており、IXPE 衛星の観測で検出可能性があることがわかった。

第5章 まとめ

検出器には「エネルギー分解能」「モジュレーションファクター µ100」「有効面積」が存在し、IXPE 衛 星に搭載予定の検出器においても、装置特有の影響を受けることで真の偏光度、偏光方位角が観測できな い。µ100 を解析の際に考慮することで入力した偏光度、偏光方位角を再現できること、また、スペクトル フィットを使うことで、装置の応答をフルに取り込んで偏光度、偏光方位角を算出することができた。この ことから、IXPE 衛星で X 線偏光観測シミュレーションの最初のステップとして、一時的に偏光度を 10 倍 にしてシミュレーションを行い、一般相対論効果による偏光情報 (特に偏光方位角)のエネルギーによる変 化を検出することができるとわかった。現実的なモデルでシミュレーションを行い、感度の評価、必要な観 測時間を見積もることが次のステップである。BH の降着円盤の幾何学的構造の解明、一般相対論効果の実 証に大きな一歩となることを期待する。

謝辞

本研究におきましては、指導教員の水野先生の丁寧なご指導の下、無事完成させることができました。大 変、感謝致しております。

参考文献

- [1] ブラックホールに吸い込まれる直前の物質の幾何構造,https://www.astroarts.co.jp/article/hl/a/9996_cygx1
- [2] 川中 宣太, ブラックホール磁気流体円盤コロナ からの X 線放射と X 線連星への応 用,http://www.resceu.s.u-tokyo.ac.jp/workshops/resceu08s/presen/norita.pdf
- [3] Shakura, N.I., and Sunyaev, R.A., "Black holes in binary systems. Observational appear-ance.", Astron. Astrophys., 24, 337-355, (1973)
- [4] 小山勝二、嶺重慎『ブラックホールと高エネルギー現象』日本評論社,2015年,p46
- [5] 小山勝二、嶺重慎『ブラックホールと高エネルギー現象』日本評論社,2015年,p48
- [6] Martin C.Weisskopf,2018,An Overview of X-ray Polarimetry of Astronomical Sources,Galaxies 2018,P10
- [7] 超小型 硬X線偏光観測衛星 TSUBAME の開発,http://www.hp.phys.titech.ac.jp/yatsu/tsubame_science/hxcp.html
- [8] FNの高校物理, 偏光とは何か(光の強度と偏光),
 http://fnorio.com/0124polarization_of_light0/polarization_of_light0.html
- [9] 一般相対性理論とは?わかりやすく5分で解説, https://dictionary.hatenadiary.jp/entry/2018/09/08/000000
- [10] Dovciak2008_MNRAS_BHspin_Pol,
- [11] NASA Taps SpaceX for Science Mission to Study X-Rays From Black Holes, https://www.inverse.com/article/57465-spacex-ixpe
- [12] Martin C.Weisskopf,2018,An Overview of X-ray Polarimetry of Astronomical Sources,Galaxies 2018,p10
- [13] 技術情報館「SEKIGIN」,http://sekigin.jp/science/chem/chem_05_0_02_4.html
- [14] 広島大学 D1 山本龍哉, 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,p12
- [15] Martin C.Weisskopf,2018,An Overview of X-ray Polarimetry of Astronomical Sources,Galaxies 2018,p11